FISICA
AL ALCANCE DE TODOS

CRISTALES LIQUIDOS

S. Pikin
L. Blinov

EDITORIAL MIR MOSCÚ

FISICA
AL ALCANCE DE TODOS

FISICA AL ALCANCE DE TODOS

С. А. Пикин, Л. М. Блинов

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

FISICA AL ALCANCE DE TODOS

CRISTALES LIQUIDOS

S. Pikin, L. Blinov

Traducido del ruso por
Ruben Presto

EDITORIAL MIR MOSCU

Editorial Mir Moscù
Rubiños 1860 - MADRID

Impreso en la URSS

УДК 591.1=60

Сергей Алексеевич Пикин
Лев Михайлович Блинов

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Научный редактор Роберто Сала. Издательский редактор Л. Головина. Художник А. Антонова. Художественный редактор Е. Подмарькова. Технический редактор Л. Житникова. Корректор Г. Макарова.

ИБ № 5008

Сдано в набор 26.04.85. Подписано к печати 21.10.85. Формат 84 × 108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Печать высокая. Гарнитура обыкновенная. Объем 3,41 бум. л. Усл. печ. л. 11,44, в т. ч. вкл. 0,10 п. л. Усл. кр.-отт. 13,85. Уч.-изд. л. 12,03. Изд. № 13/3253. Тираж 9350 экз. Зак. 0202. Цена 96 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР». 129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер. 2.

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7 «Искра революции» Союзполиграфпрома Государственного комитета СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 103001, Москва, Трехпрудный пер., 9.

П $\frac{1704060000-517}{056(01)-85}$ 151—85, ч. 2

На испанском языке

© издательство "Наука", 1982

© traducción al español, editorial Mir. 1985

INDICE

PREFACIO 7

Introducción. DEL PASADO AL FUTURO 8

Capítulo I.
LIQUIDO CON EJE ÓPTICO 12
§ 1. ¿Qué es el líquido? 12
§ 2. Modelos recreativos de las moléculas 18
§ 3. ¿Qué papel desempeña el eje óptico? 24
§ 4. Seis maravillas de la luz 26
§ 5. ¿Dónde se puede encontrar el polarizador? 42
§ 6. La séptima maravilla de la luz 45
§ 7. De los defectos de la orientación al nombre "nemático" 48

Capítulo II.
EFECTO DE FREDERIKS 55
§ 1. A pesar de todo el nemático es elástico 55
§ 2. ¿Qué desplazamientos sufre el eje óptico por la acción del campo eléctrico? 61
§ 3. ¿Cómo funciona la esfera de reloj electrónico? 68
§ 4. Los "dueños" y los "huéspedes" 70
§ 5. Cristales líquidos y holografía 79
§ 6. El televisor de "bolsillo" 84

Capítulo III.
LAS SORPRESAS DE LA CONVECCIÓN 89
§ 1. ¿Está relacionada la velocidad de la corriente con el eje óptico? 89
§ 2. El ornamento de orientación 91
§ 3. La corriente eléctrica agita el nemático 98
§ 4. El modelo de la niebla y las cortinas dirigidas 100

Capítulo IV.
MOLÉCULAS ESPIRALES 107
§ 1. Las moléculas izquierdas y derechas 108
§ 2. Sobre la maestría del químico 113
§ 3. La estructura twist y el paso de la espiral 121
§ 4. Gigantesca actividad óptica 128
§ 5. Reflexión selectiva de la luz 133
§ 6. En el calor se pone azul y en el frío, rojo 139
§ 7. El termovisor de capa fina 142

Capítulo V.
CRISTALES LÍQUIDOS PARCIALMENTE SÓLIDOS 148
§ 1. El cristal sólido es tridimensional 148
§ 2. Red sólida de hilos líquidos 154
§ 3. El mejor coque y la fibra ultrarresistente 159
§ 4. El cristal que es sólido sólo en una dirección 161
§ 5. Esmécticos ... ¿Cuántos son? 169
§ 6. Antípodas ópticas en los esmécticos 175
§ 7. ¡Fusión durante el enfriamiento! 179
§ 8. El lápiz de láser y el "roentgen" ultrasonoro 183
Capítulo VI.
EXCURSIÓN A LA BIOLOGÍA 188
§ 1. Razonamientos generales 188
§ 2. El agua y las moléculas de cola larga 189
§ 3. Células y membranas 194
§ 4. Cristales líquidos y comportamiento de las membranas 199
§ 5. De la ciencia-ficción 207
§ 6. Un cristal bueno es un mal síntoma 208
§ 7. ¿Qué novedades hay en la evolución? 210

PREFACIO

Hemos decidido escribir un libro entre los dos que trate de cristales líquidos. Sin duda alguna casi todos han oído hablar sobre estas sustancias insólitas, que se emplean en los dispositivos electrónicos modernos, incluso los periódicos, sin hablar ya de revistas y libros, escriben sobre estas sustancias.

La ciencia sobre los cristales líquidos es una de las más jóvenes y más difíciles ramas de la física. Las dificultades están condicionadas por la complejidad de las moléculas que forman estas sustancias. Para explicar la propiedad de los cristales líquidos es indispensable utilizar no sólo la teoría de líquidos ordinarios, bastante complicada por sí misma, sino también la ciencia acerca de los cristales sólidos, por ejemplo, la cristalografía y física del sólido.

El propósito de los autores es explicar la teoría de los cristales líquidos sin fórmulas matemáticas, pero de una forma más fácilmente asimilable y figurada. Esta tarea es bastante difícil ya que la rigurosidad científica la queríamos, en límites razonables, combinar con los ejemplos y analogías tomados de la naturaleza viva y muerta. Quisiéramos también dar a conocer al lector numerosas aplicaciones de los cristales líquidos, pero sin alejarse del tema.

Incansablemente criticándonos el uno al otro, teníamos que escribir un libro que fuese comprensible para todos los lectores y principalmente para los alumnos de las clases superiores. Hemos intentado aclarar un círculo amplio de problemas, que incluyen la estructura de diversos cristales líquidos (entre ellos los más modernos), numerosos efectos de su interacción con los campos exteriores, así como las aplicaciones a la técnica y biología.

Esperamos que nuestra obra sea útil y el libro atraiga la atención de algunos jóvenes hacia una nueva rama de la ciencia cautivadora, como es la física de los cristales líquidos.

S. A. Pikin
L. M. Blinov

Introducción
DEL PASADO AL FUTURO

Los cristales líquidos no tuvieron suerte. Aunque su descubrimiento coincidió con el momento en que se formaban los cimientos del edificio de la física moderna, sólo ahora, levantando este edificio por un rincón, intentan poner los cristales líquidos en su verdadero sitio: precisamente el fundamento es su lugar adecuado. Y es que durante toda la historia, desde la remota antigüedad hasta nuestros días, el hombre no consiguió salir afuera de las tres nociones, que describen, según parecía, todos los estados de materia: gas, líquido y sólido.

Al hombre, por su naturaleza, le es difícil discernir las contradicciones internas en una u otra noción. Para él es más fácil tomar una decisión de tipo "o aquello u otro", que "y aquello y esto". El mérito del gran filósofo alemán Hegel consistía precisamente en que él percibió el principio general de desarrollo en la unidad y la lucha de los contrarios. Pero también al cabo de un siglo el hombre con gran dificultad reconoció que el electrón es una partícula y una onda al mismo tiempo, que la masa y la energía son un todo único y que las propiedades del cristal y del líquido pueden coincidir en una sustancia: en el cristal líquido.

Pasaron unos veinte años desde el momento, cuando en 1888 el botánico austriaco F. Reinitzer y el cristalógrafo alemán F. Lejman describieron las propiedades insólitas de los cristales líquidos *), antes de que los científicos empezaran a darse cuenta de que se ha descubierto un nuevo estado de la sustancia. Realmente, estas sustancias poseían fluidez, como los líquidos ordinarios y al mismo tiempo sus propiedades ópticas se parecían de un modo asombroso a las de los cristales. Resultó que el orden de la disposición de

*) En el libro de A. S. Sonin "Centauros de la naturaleza" (А. С Сонин. Кентавры природы. М.: Атомиздат, 1980) se relata de manera cautivadora sobre la historia del descubrimiento de los líquidos.

los átomos, característico para los cristales, puede ser incompleto y que, en general, puede tener el orden de diferentes tipos (por ejemplo, un orden en la orientación de las moléculas y otro, en la posición de los centros de sus masas). Esto significa que puede haber no uno, sino varios tipos de estados intermedios. Ahora seguramente nadie se asombrará si se descubre un estado intermedio entre el gas y el líquido. En todo caso, a la noción de "película gaseosa" se recurre al discutir las propiedades de las capas líquidas de la sustancia de una molécula de grosor *).

A principios de nuestro agitado siglo D. Vorländer en la ciudad universitaria Halle (Alemania) con sus treinta posgraduados preparó varios centenares de nuevos cristales líquidos. Ya nadie duda de su realidad; y los físicos que por regla general tratan con gran precaución los compuestos químicos complejos los investigan de buena gana.

J. Friedel, en Francia, propone la primera clasificación de los cristales líquidos, el holandés S. Oseen y el checo J. Zocher fundan una teoría de elasticidad y V. K. Frederiks y V. N. Tsvetkov en la URSS, en los años 30, por primera vez investigan sus singulares propiedades eléctricas y ópticas.

Los éxitos en la física atómica, física de semiconductores y química de los polímeros eclipsaron para un tiempo las investigaciones de los cristales líquidos que parecían sencillas y académicas. Hasta los años 60 sólo los entusiastas aislados estudiaban los cristales líquidos. Mientras tanto se desarrollaba tempestuosamente la electrónica. Transcurre el proceso de microminiaturización de los dispositivos: desde los tubos electrónicos hasta los transistores, después hasta los circuitos integrados y, por fin, los GCI (grandes circuitos integrados). Disminuyen las potencias consumidas y se reducen las fuentes de alimentación. Pero entonces resulta que hay todo, menos un dispositivo económico de pequeñas dimensiones, capaz de transmitir la información del circuito electrónico al hombre. Es que el tubo de televisión es demasiado grande y los diodos semiconductores que emiten la luz, consumen grandes corrientes, etc.

Entonces se acuerdan de los cristales líquidos. En los EE.UU. de nuevo descubren los efectos, relevados antes por V. K. Frederiks y V. N. Tsvetkov. Empieza un gran boom.

Al aparecer los dispositivos electrónicos con cuadros y

*) Se llama también capa monomolecular. (*N. del Tr.*).

cuadrantes a base de cristales líquidos (relojes, calculadores, diccionarios-traductores electrónicos, pantallas planas de televisión, etc.) empezó el "renacimiento" en la física y química de los cristales líquidos. Se investiga activamente su estructura, se estudia en todos los aspectos la fluidez, se crean nuevas sustancias, en las cuales se descubren numerosos fenómenos insólitos, provocados por la acción de fuerzas exteriores (campo eléctrico, temperatura, etc.).

Mediante las obras de los científicos de diferentes especialidades y países (sobre todo de la URSS, Francia, EE.UU., Gran Bretaña) la ciencia sobre los cristales líquidos se desarrolló rápidamente y adquirió su configuración clara y rigurosa, su propia cara.

Entonces a la larga cola de un botánico, unos cristalógrafos, decenas de químicos, centenas de físicos y miles de especialistas en electrónica se acerca un hombre y pregunta: ¿Quién es el último? ¡Resulta que es un biólogo!

Incluso en los más completos cursos modernos de biología no se dice ni una palabra sobre los cristales líquidos. Mientras tanto en la mente de las personas más clarividentes poco a poco "se cristaliza" la idea de que la esencia de todo lo vivo está inseparablemente unida con la estructura ordenada de las células de los organismos vivos. Pero el componente principal del organismo vivo es el agua y las soluciones ordenadas son precisamente los cristales líquidos. Ya están haciéndose pruebas de explicar los procesos fundamentales, que transcurren en el organismo vivo precisamente con ayuda de tales enfoques, que elaboró la física de los cristales líquidos. La transferencia selectiva de distintas sustancias a través de la frontera de la célula viva, es decir, de la membrana, la propagación de la excitación por los tejidos nerviosos, la enfermedad y el envejecimiento de las células y por consecuencia del organismo entero, el mecanismo de la síntesis de las moléculas autorreproductoras — he aquí algunos de los problemas biológicos a cuya resolución pueden ayudar las investigaciones de los cristales líquidos. Se enuncian conclusiones bastante argumentadas sobre el papel esencial del estado líquido cristalino en la evolución de la vida en la Tierra.

Nuestra profunda convicción consiste en que tanto en la ciencia sobre los cristales líquidos, como en los aspectos técnicos, relacionados con su aplicación, estamos sólo en el principio del camino. Y el ladrillito casualmente caído de los cimientos de la física, será puesto en su sitio.

Tabla del empleo de los cristales líquidos

Acciones exteriores	Campo de empleo	Tipo del cristal líquido
Temperatura	Indicadores de temperatura	Colestéricos
	Registro térmico con el rayo láser	Colestéricos, esmécticos *A*
	Filtros ópticos	Colestéricos, nemáticos
	Visualización de emisiones y holografía	Colestéricos, nemáticos
	Autoenfoque térmico de la luz	Nemáticos
	Artículos decorativos y de joyería	Colestéricos
Presión y otras acciones mecánicas	Óptica acústica (visualización de emisiones acústicas, etc.)	Nemáticos
	Visualización de corrientes	Nemáticos, colestéricos
	Control de la calidad de artículos sin destrucción	Nemáticos
	Captadores de presión	Esmécticos *C* (ferroeléctricos)
Impurezas químicas	Análisis de mezclas de gas	Colestéricos
	Criminología	Colestéricos
Campo electromagnético	Pantallas electroópticas	Nemáticos, colestéricos, esmécticos
	Moduladores y filtros ópticos dirigidos	Nemáticos
	Materiales para la óptica no lineal	Esmécticos *C* (ferroeléctricos)
	Control de los circuitos eléctricos sin su destrucción	Nemáticos
	Electrofotografía	Colestéricos
	El registro fotoquímico de la imagen	Colestéricos
Emisión corpuscular	Dosímetros de radiación	Colestéricos, esmécticos

Capítulo I
LÍQUIDO CON EJE ÓPTICO

§ 1. ¿QUÉ ES EL LÍQUIDO?

Admiramos el agua desde la infancia. A partir del primer baño, el hombre no se cansa de asombrarse de las propiedades del líquido, que se escurre fácilmente entre los dedos y causa dolor, al dar un golpe fuerte sobre la superficie del agua. Miramos encantados el derretimiento primaveral y los flujos de agua pluvial con remolinos complicados, los chorros monumentales de gigantes cataratas y los cambios de tono de la luz, del color y las sombras en el arroyo forestal, el resplandor azul del mar y los centelleantes granos del rocío. Todos estos fenómenos están relacionados con propiedades del líquido como la fluidez y la viscosidad, la tensión superficial y adhesión a los sólidos, la capacidad de reflejar, refractar y dispersar la luz. Los objetos que dieron el nombre a este libro, poseen semejantes propiedades, aunque hay que decirlo de antemano, que los cristales líquidos tienen una serie de peculiaridades impropias a los líquidos habituales. Para comprender las peculiaridades de los cristales líquidos es necesario recordar, qué es, en general, un líquido.

Estructura, fuerzas de interacción de las moléculas, tensión superficial. A pesar de la sencillez aparente y la accesibilidad, el estado líquido aún no está estudiado con plenitud y profundidad como quisiéramos, por lo menos, como están investigados los cristales sólidos y gases rarificados. Es que en el líquido los átomos y las moléculas que lo componen, interaccionan lo suficientemente fuerte entre sí (a diferencia de los gases), pero al mismo tiempo pueden libremente trasladarse uno respecto a otro, sin permanecer en un mismo sitio (a diferencia de los cristales).

En el líquido los átomos y las moléculas no pueden separarse a cualquier distancia por lo grande que sea. Por ejemplo, el agua vertida en la cazuela, no desaparece sin alguna causa especial. Esto significa que entre las molécu-

las de agua accionan fuerzas de atracción considerables. Estas fuerzas, en realidad, no son tan grandes como en el cristal, donde ellas obligan a los átomos y las moléculas que ocupen posiciones fijas en la red cristalina. El calentamiento conduce al aumento de la movilidad de las moléculas. A temperatura alta, las moléculas empiezan a moverse con tanta rapidez que las fuerzas de atracción por parte de los vecinos ya no pueden mantener las moléculas en un volumen acotado y el líquido se transforma en gas.

Dentro del recipiente con un líquido hay, por término medio, un balance de fuerzas (fig. 1.) Otra cosa se observa en la superficie. Aquí la resultante de las fuerzas de atracción está dirigida hacia adentro y por eso la superficie del líquido no desaparece. La capa superficial desempeña el papel de película elástica, la cual en condiciones de equilibrio, tiene un área completamente fija. Todo aumento artificial de esta área — el ensanchamiento de la película — pone en acción las fuerzas elásticas que tienden a reducir esta superficie, es decir, restablecer su área de equilibrio.

Al mismo tiempo, basándose en el experimento, sabemos muy bien que el líquido ejerce gran resistencia a la compresión. No es tan fácil apretar el agua en la bomba mediante el émbolo, si todos los agujeros están cerrados. Así, pues, las moléculas se oponen al acercamiento más estrecho. Esto significa que ellas se repelen mutuamente si están a distancias muy pequeñas: en otras palabras, las moléculas no pueden penetrar una en otra.

Adhesión a los sólidos. Es importante saber cómo la superficie sólida interacciona con la capa exterior de las moléculas del líquido. Sobre las moléculas en superficie sólida accionan dos fuerzas de atracción: una, por parte del líquido y la otra, por parte del sólido. Si las moléculas del líquido que se encuentran fuera de la capa exterior, atraen con mayor intensidad, la superficie de la gota tiende a estar en contacto lo menos posible con la superficie sólida (fig. 2, *a*). Esto es un ejemplo de no humectación y, en parti-

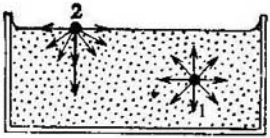


FIG. 1. *La resultante de las fuerzas de atracción para las moléculas 1 dentro del volumen es igual a cero y para las moléculas 2 sobre la superficie está dirigida hacia adentro del líquido.*

cular, repulsión de agua. Si el material sólido atrae con mayor fuerza, el líquido tiende a ocupar el mayor sitio posible sobre la superficie sólida (fig. 2, *b*). He aquí un ejemplo de humectación. En caso de humectación, el líquido en la rendija estrecha tiene una superficie cóncava y cuando no hay humectación, convexa. De aquí se desprende que el líquido que humecta debe introducirse en el tubo capilar, o sea, en una rendija estrecha entre dos placas sólidas. Esto se debe a que las fuerzas elásticas de la película curvada tienden a reducir su superficie, es decir, la parte central de la película tiene que penetrar en la rendija. Pero las moléculas del líquido en los puntos de contacto con las paredes del recipiente forman de nuevo una superficie cóncava, tratando de contactar en lo más posible, con el material sólido, etc. (fig. 2, *c*). En este caso se dice que el líquido se mueve bajo la acción de las fuerzas capilares.

Corriente viscosa, movimiento vortiginoso. Por lo general las moléculas del líquido, cayendo sobre la superficie sólida, se pegan a ella fuertemente de modo que es casi imposible arrancarlas. Por eso si se desplaza la placa de vidrio superior paralelamente a la de abajo (inmóvil) con velocidad v (fig. 3), la velocidad de la capa superior del líquido será v y la de la inferior, nula. En la profundidad intermedia la velocidad tiene el valor intermedio entre 0 y v como ilustra la figura. El líquido fluye como si fueran capas, cada una de las cuales fluye con su velocidad. La distinta ve-

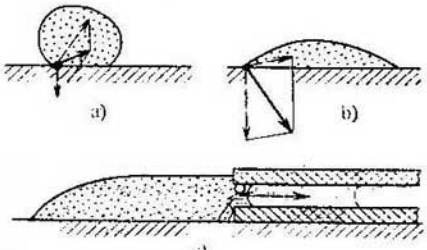


FIG. 2. *La resultante de las fuerzas para la molécula del líquido que se halla en el extremo de la gota, la cual roza la superficie sólida:*

a) no hay humectación; b) hay humectación; c) la gota del líquido se hunde en una rendija estrecha entre las placas sólidas en el caso de humectación.

locidad de las capas surge a causa del rozamiento interno entre ellas, que en el líquido se llama viscosidad. En general, la viscosidad describe la fuerza que surge sólo al moverse las capas del líquido una respecto a otra. La detención de la placa en seguida interrumpe la acción de esta fuerza en el líquido. Esto distingue el líquido del cristal en el cual, como en un resorte, después de retirar la carga, continúa actuando la fuerza elástica que hace retornar los átomos a su sitio. A propósito, el líquido puede parecer sólido y elástico, si se actúa sobre éste con gran rapidez (si se da un golpe bruscamente con la palma de la mano, si se tira una piedra plana casi paralelamente a la superficie del agua). Las moléculas durante esta acción conservan parcialmente sus posiciones instantáneas en el espacio y el líquido en estos momentos se porta casi como un sólido.

Si se tira despacio de la placa superior con una velocidad constante (fig. 4), se establece una corriente laminar (de capas) suave. En este caso las moléculas permanentemente saltan de capa en capa: las moléculas rápidas se hacen más lentas y las lentas, más rapidas, es decir, ocurre un cambio de impulsos de movimiento, lo que crea el mecanismo de fricción. Cuando se encuentre en el camino de este flujo algún obstáculo (por ejemplo, en la fig. 4, *a* un cilindro), las capas suavemente lo contornean. Pero si se aumenta considerablemente la velocidad v semejante corriente tranquila se destruye y detrás del cilindro surgirán remolinos y torbellinos (fig. 4, *b*). A menudo observamos este fenómeno en los arroyos tempestuosos después de un potente chaparrón. La causa de esto consiste en que, al fluir rápidamente a distancias comparables con el tamaño del obstáculo, las moléculas no tienen tiempo de saltar de capa en capa de modo que se asegure un mecanismo de fricción arreglado y se disminuya suavemente la velocidad de las capas.

En este caso la viscocidad del líquido no es tan importante, las capas se quiebran, se mezclan, en resumidas

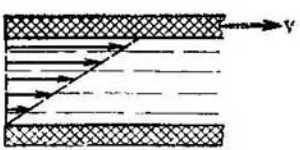


FIG. 3. *La corriente del líquido viscoso: distribución de la velocidad según el grosor de la capa.*

cuentas, empieza el movimiento vortiginoso. Este efecto influye en el trabajo de muchas máquinas y, en particular, en el movimiento de los submarinos, a los que les molesta mucho a causa del gasto de mucha energía y formación del ruido.

Fenómenos de convección. Para todos estos fenómenos no es obligatorio que en el camino de la corriente del líquido se encontrara un obstáculo sólido. Hay casos cuando en el líquido puro, inmóvil al principio, surge premiro una corriente suave y después, vortiginosa. Por ejemplo, esto ocurre durante la convección. La convección es un fenómeno muy difundido, el cual se observa si calentamos la capa inferior del líquido y la superior la dejamos fría. En este caso las capas más frías, o sea, las capas superiores más densas tienden a bajar mientras que las capas más inferiores templadas, es decir, menos densas, se precipitan hacia arriba, bajo el movimiento del empuje (principio de Arquímedes) (fig. 5). El proceso suave del movimiento empieza cuando las fuerzas de empuje se igualan con las fuerzas de fricción y las sobrepasan. Es natural que la corriente laminar entre placas no puede empezarse en un punto y cortarse en otro. Esta corriente tendrá que ser cerrada conforme al principio de la conservación de la masa, es decir, debe tener el aspecto de unas células en capas (fig. 5). En un extremo de la célula el líquido es más caliente y en el otro, más frío, en comparación con lo que tuviera lugar en ausencia del movimiento. Pero entonces al lado de esta célula tendrían que aparecer con más razón también otras células iguales. Así ocurre en el experimento: a lo largo de la placa el líquido se divide en semejantes células de convección. Cuanto mayor es la diferencia de temperaturas entre las

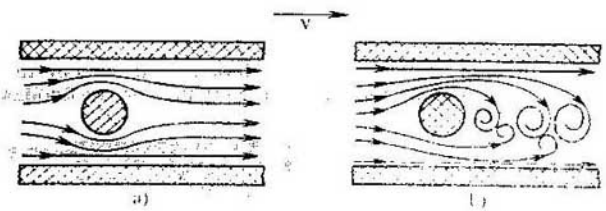


FIG. 4. *Contorneo del obstáculo por el flujo del líquido a distinta velocidad:*
a) corriente lenta; *b)* formación de torbellinos durante la corriente rápida.

capas inferiores y superiores tanto mayor velocidad tiene la corriente en las células, y a velocidad muy grande, las células se destruyen y se forman torbellinos.

Las corrientes de convección se observan no sólo en la mesa laboratoria, sino también en enormes espacios de los océanos de agua y aire. La circulación de enormes masas de agua y aire, provocada por el distinto calentamiento de la tierra, mar y atmósfera, de hecho condiciona todos los caprichos del tiempo, borrascas y tifones, muchos fenómenos meteorológicos de estación en diferentes continentes. Las células de convección se puede a veces observarlas por la portilla del avión que vuela por encima de las nubes: se ven hexágonos casi regulares con los lados de unos kilómetros (fig. 6). Este fenómeno está relacionado con la temperatura más alta de la Tierra y la capa inferior de las nubes en comparación con la temperatura del aire a gran altura. Si se mira desde arriba la forma de las células se explica por el hecho de que en el plano de capa nublosa, todas las direcciones son equitativas y por eso la configuración de la célula tiene que ser simétrica. Los hexágonos precisamente son las figuras simétricas que se pueden ajustar perfectamente una a otra *). Lo mismo se observa también en miniatura en una capa fina de líquido entre dos placas de vidrio. En este caso la longitud del lado del hexágono es aproximadamente igual al espesor de la capa ya que esta capa no tiene ninguna otra distancia característica.

Mencionamos, quizás, las propiedades más importantes de líquidos ordinarios (y gases densos) que son propias, como veremos, también a los cristales líquidos. Sin embargo,

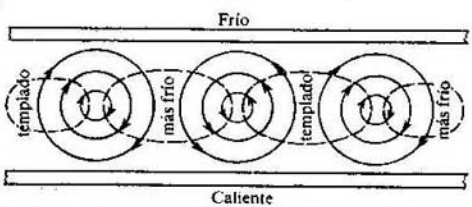


FIG. 5. *Corriente de convección lenta en la capa del líquido.*

*) Estas consideraciones sobre la simetría y empaquetamiento denso de las células tienen una argumentación rigurosa, merced a los cálculos de la ventaja energética de un sistema u otro de células de convección.

estas propiedades obtendrán otros matices en los cristales líquidos ya que ellas se combinarán con las propiedades de cristales sólidos. Para ver esto hace falta conocer las peculiaridades de la estructura e interacción de las moléculas.

§ 2. MODELOS RECREATIVOS DE LAS MOLÉCULAS

El relato dedicado a los líquidos afirmaba que las moléculas de éstos, sólo por término medio, se encuentran una de otra a cierta distancia característica. La respuesta a la pregunta de cómo interaccionan entre sí las moléculas y cuál es la distancia media a entre ellas, nos la da la mecánica cuántica. Dicha ciencia muestra que en efecto, entre las moléculas, a grandes distancias, surgen fuerzas de atracción y a distancias muy pequeñas, fuerzas de repulsión. Precisamente las fuerzas de atracción y de repulsión se equilibran a la distancia a, la cual convencionalmente se puede denominar dimensión de las moléculas.

Sabemos que el átomo consta de un núcleo con carga positiva y una nube de electrones con carga negativa que rodea al primero. Por eso las moléculas, compuestas de átomos, son en sí una estructura bastante afiligranada de núcleos, envuelta por nubes electrónicas (fig. 7). Si las moléculas se aproximan una a otra, las nubes electrónicas son las primeras que entran en contacto y empiezan a repelerse enérgicamente la una de la otra *). Al alejarse unas moléculas de otras, las fuerzas de repulsión disminuyen rápidamente. En total el átomo es neutro: la nube, cuya carga es

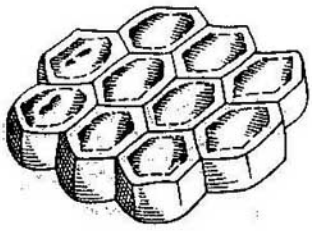


FIG. 6. *Las células de convección hexagonales pueden observarse en la capa de las nubes.*

*) En lo fundamental, esta repulsión está condicionada por efectos cuánticos.

negativa, compensa exactamente la carga positiva del núcleo. Por esto la cuestión acerca de la fuerza de interacción de los átomos o moléculas, los cuales por sí mismo no tienen carga eléctrica, se complica en el caso de grandes distancias. A pesar de todo intentaremos analizar esta cuestión en el ejemplo de los átomos.

Imaginémonos que por una causa eventual, en el átomo primeramente neutro, se produce un desplazamiento de la nube electrónica con carga negativa respecto al núcleo con carga positiva (fig. 8). Este sistema es equivalente a dos cargas de signo contrario, situadas a cierta distancia una de otra. Entonces, como se sabe, alrededor de dos cargas de signos contrarios, surge un campo eléctrico E, cuyas líneas de fuerza están representadas en la fig. 8, *a*. Al alejarse del átomo, dicho campo disminuye rápidamente. Si en las cercanías del átomo *1* se encuentra el átomo neutro *2* (véase la fig. 8, *b*), el campo eléctrico engendrado por el

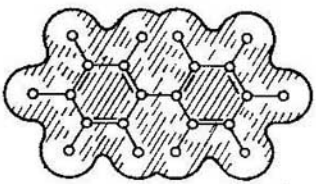


FIG. 7. *Nubes electrónicas:* modelo de la molécula (se muestran la disposición de los núcleos y los enlaces entre los átomos).

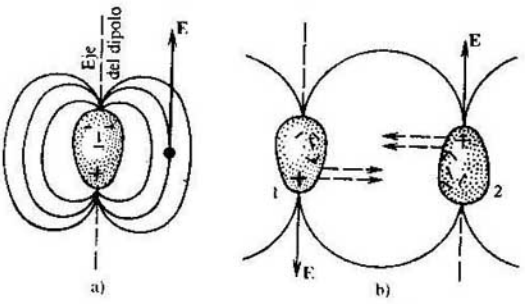


FIG. 8. *Dipolos eléctricos y fuerzas de atracción:* *a*) el dipolo atómico crea un campo eléctrico; *b*) átomos neutros se atraen a largas distancias.

primero en este lugar, tiene que desplazar las cargas de los electrones y del núcleo tal y como está representado en la fig. 8, *b*. A su vez, semejante desplazamiento relativo de las cargas en el átomo *2* debe crear un campo eléctrico en el lugar de estancia del átomo *1* y de esta manera efectuar la correspondiente separación de las cargas en el átomo *1*.

Todo esto significa que dos átomos neutros excitan y mantienen ciertos valores del campo eléctrico uno en otro y del sistema de cargas. El sistema mencionado de cargas de signo contrario, situadas a determinada distancia la una de la otra, se denomina dipolo eléctrico (literalmente el que posee dos polos). ¿A qué conduce la formación de los dipolos? De la figura 8, *b* se ve que las partes del átomo con cargas opuestas deben atraerse mutuamente (las fuerzas correspondientes están representadas con flechas punteadas) y por consiguiente también los átomos enteros tienen que atraerse el uno al otro. Por esas mismas causas y por el mismo mecanismo las moléculas neutras deben atraerse mutuamente a cuenta de la formación de los dipolos.

A temperaturas bajas, cuando los impulsos térmicos se debilitan, las fuerzas de atracción y de repulsión descritas alinean las moléculas en filas y columnas geométricas precisas, o sea, se forma el cristal. A temperaturas moderadas, los impulsos térmicos que se intensifican desorganizan las filas precisas de moléculas, pero estas últimas aún no pueden, por término medio, dispersarse a gran distancia: esto es el líquido. Por fin, las altas temperaturas no dejan a las moléculas ningunas posibilidades de mantenerse juntas: el líquido se transforma en gas.

Es interesante que puede hacerse con facilidad un modelo mecánico ilustrativo del líquido, si echamos bolitas de acero de tamaño estándar en un cajón. En este caso las fuerzas que mantienen las bolitas unidas serán las fuerzas de gravedad de las bolitas y las que actúan sobre ellas por parte de las paredes del cajón (capa elástica). Las fuerzas de repulsión ahora están relacionadas naturalmente con la forma sólida de las bolitas. Mediante el sacudimiento del cajón se pueden imitar los impulsos térmicos. Si no sacudimos el cajón, las bolitas formarán una red regular, y si lo sacudimos sensiblemente, éstas empezarán a desplazarse libremente dentro del cajón en cualquier dirección. En la vida real como ejemplo del comportamiento líquido de una masa de bolitas casi sólidas y bastante grandes pueden servir las arenas movedizas. En ellas los granos de arena, o

sea, los granos de forma redondeada de 0,1—1 mm de diámetro, son mojados por el agua de las fuentes subterráneas. La película húmeda, adquirida por los granos, no permite a éstos pegarse, es decir, las fuerzas de atracción disminuyen. Como resultado, las arenas movedizas adquieren fluidez y como, se sabe, pueden representar peligro para objetos relativamente pesados.

Así son los líquidos ordinarios compuestos de moléculas relativamente simples. Pero a nosotros nos espera un descubrimiento notable, si las moléculas no tienen una forma esférica, sino digamos, una forma muy alargada en una dirección o muy aplanada. En estos casos los átomos dentro de las moléculas se sitúan principalmente o bien a lo largo de una línea determinada (fig. 9, *a*), o bien yacen en el plano señalado (fig. 9, *b*).

Claro está que, según las causas descritas anteriormente, la mayor parte de los átomos de una molécula trata de situarse al lado de los átomos de otra molécula, ya que sólo en este caso las fuerzas de atracción y repulsión se equilibran. Si se aproximan sólo dos de los extremos de las moléculas vecinas y los otros dos están alejados uno de otro, las fuerzas de atracción harán que se atraigan los extremos alejados, y las fuerzas de repulsión no permitirán que las moléculas penetren una en otra. Pero esto significa que los ejes (a) o los planos (b) seleccionados de las moléculas deben ser paralelos entre sí. El hecho de que la forma de la

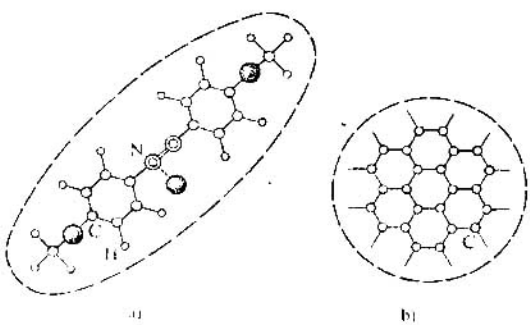


FIG. 9. *A veces las moléculas tienen una forma peculiar de barra (a) o de disco (b).*

molécula no es esférica puede caracterizarse por el vector e de longitud unitaria, el cual en el caso (a) es paralelo al eje de la molécula y en el caso (b) es perpendicular al plano de la molécula.

De esta manera llegamos al concepto del "cristal líquido". Se llama cristal líquido el líquido con las moléculas no esféricas descritas, las cuales no sólo son retenidas, como promedio, a cierta distancia *a* una de otra, sino que además poseen los vectores e paralelos al eje L. Así, pues, la distancia *a* es aproximadamente igual al grosor de la molécula. Subrayemos que aunque en este estado los ejes o los planos de las moléculas son paralelos (fig. 10), de todos modos, la sustancia permanece en estado líquido. Los centros de las masas de las moléculas no forman en este caso retícula periódica, como en el cristal, sino que se sitúan caóticamente en el espacio y pueden desplazarse libremente en él.

Por supuesto, la orientación de las moléculas en un líquido tan insólito obedece a un orden fijo sólo a temperatura moderada, cuando los impulsos térmicos no son tan fuertes, para que se deshaga este orden de orientación. El brusco aumento de la temperatura conduce obligatoriamente a una destrucción del orden en la orientación de las moléculas, cuando su movimiento caótico de traslación y de rotación se convierte en predominante. Prácticamente al calentar el cristal líquido, éste se convierte en un simple líquido.

Hay que decir que la existencia de uno u otro estado líquido no depende sólo de la temperatura. También tiene gran importancia el número de moléculas no esféricas que se en-

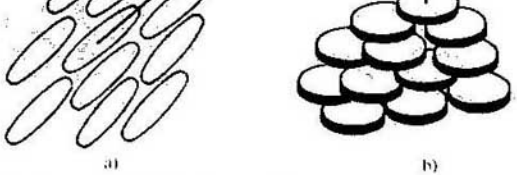


FIG. 10. *Los cristales líquidos pueden confeccionarse de las moléculas-barras (a) y moléculas-discos (b).*

cuentran por unidad de volumen, o sea, la densidad de la sustancia. Esto se refiere, especialmente, a las moléculas que por alguna razón se atraen débilmente unas a otras. Entonces hay que aclarar la cuestión de si pueden las fuerzas de repulsión de las moléculas garantizar el orden de orientación de las moléculas a temperaturas moderadas. Resulta que pueden. Esto puede verse en la figura 11, donde están representadas las moléculas de forma alargada, parecidas a barras.

Si el número de moléculas-barras es reducido, o sea, la densidad de la sustancia es pequeña, entonces a diferentes giros, ellas tienen la posibilidad de que sus nubes electrónicas no entren en contacto mutuo. En este caso las moléculas, sin molestar unas a otras, giran en el espacio de cualquier manera, lo que significa que no hay ningún orden. Para esto es suficiente darle a cada molécula en el líquido cierto volumen, o sea, un cubo con una dimensión de la arista igual aproximadamente a la longitud de la molécula l. Dentro de los límites de este cubo cuyo volumen es l^3 la barra puede realmente orientarse de cualquier manera (fig. 11, *a*).

Ahora introduzcamos la misma cantidad de moléculas en un volumen más pequeño, es decir, aumentemos la densidad de la sustancia. Como resultado, a cada molécula le corresponderá un volumen inferior a l^3. En este caso ¿cómo se distribuirán las moléculas? Es natural que ellas podrán dislocarse en menor volumen si no giran de cualquier manera tocando unas a otras y ocupan una posición más o menos paralela. Si el diámetro de la barra a es notoriamente menor que la longitud l y a cada molécula le toca un vo-

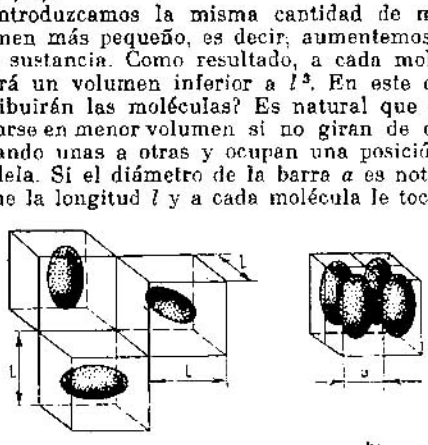


FIG. 11. *A baja densidad de la sustancia, el orden de orientación está ausente (a); el orden aparece a densidad alta (b).*

lumen a^2l, todas las moléculas deben estar orientadas de la misma manera ya que sólo en este caso ellas no chocan unas con otras (fig. 11, *b*). Pero esto sucederá sólo en el caso de una densidad muy alta. Siendo la densidad media, cuando a cada molécula le corresponde un volumen inferior a l^3, pero mayor que a^2l, el orden de orientación será sin duda no completo, pero, sin embargo, notorio. De nuevo, prestemos atención a que este orden está relacionado con que las moléculas no pueden infiltrarse mutuamente a causa de la fuerte repulsión.

§ 3. ¿QUÉ PAPEL DESEMPEÑA EL EJE ÓPTICO?

Ahora vemos que en el líquido, compuesto de moléculas no esféricas, a temperaturas y densidad moderadas de la sustancia aparece una dirección especial: el eje **L**. A lo largo de este eje se orientan las moléculas-barras y perpendicularmente a éste, las moléculas-discos. Semejantes ejes existen también en algunos cristales sólidos, compuestos, por ejemplo, de moléculas alargadas. Esta analogía entre el cristal ordinario y el líquido enigma condujo a la unión de dos conceptos viejos en uno nuevo: "cristal líquido". Los materiales adquieren ciertas propiedades ópticas especiales merced a la presencia del eje destacado en el medio líquido y red cristalina. Por eso este eje se llama óptico. De esta manera la semejanza entre el cristal líquido y el cristal sólido se revela en las propiedades ópticas *).

La peculiaridad de los materiales con ejes ópticos consiste en que ellos efectivamente, y a menudo de modo impresionante, dirigen los rayos luminosos, cambiando su intensidad, color y dirección. La velocidad de la luz depende de la dirección de su propagación con respecto al eje óptico. El rayo blanco de la luz que incide sobre el cristal bajo un ángulo al eje óptico, saliendo del cristal, puede resultar coloreado. En algunos casos se ve bien, incluso a simple vista, que el rayo luminoso al salir de este material, se divide en dos, es decir, se forman dos rayos, con la particularidad de que la intensidad de ambos puede variarse girando el cristal.

*) Es necesario mencionar que algunos cristales sólidos y líquidos de estructura más compleja tienen no uno sino dos ejes ópticos. Pero existen ejemplos de cristales sólidos, los que no poseen ejes ópticos: la red cristalina en este caso tiene simetría cúbica.

Hoy día los cristales con ejes ópticos desempeñan un papel muy importante. Ellos se emplean en todos los casos cuando hace falta dirigir los rayos luminosos rápido y precisamente: desde polaroides habituales hasta visores de láser. Los polaroides dejan pasar sólo algunos rayos luminosos. Ellos sirven de buena defensa para los ojos de los operadores de aeropuertos, marineros de cuarto en los barcos, choferes contra la luz deslumbradora de los automóviles que van al encuentro y del sol. Los filtros-polaroides se usan ampliamente en la fotografía en colores.

De vez en cuando sucede que en condiciones corrientes el cristal no posee eje óptico. Sin embargo, puede adquirirlo como resultado de cualquier acción, por ejemplo, mecánica. Ahora esta circunstancia se utiliza con frecuencia para aclarar qué peligro presentan las deformaciones en artículos técnicos complejos sometidos a cargas refinadas. Alrededor del lugar de presión de cualquier diente, el eje óptico (o ejes) adquiere en el material una orientación rara. Si todo esto se hace con un modelo transparente del artículo, la luz, pasando a través de éste, cambiará la intensidad y la dirección en correspondencia rigurosa con la dirección de los ejes ópticos. En resumidas cuentas en la pantalla aparecerá la imagen del arabesco de las deformaciones complejas (fig. 12).

Así resultó que semejantes ejes ópticos y propiedades los pueden poseer líquidos especiales con la particularidad de que los efectos enunciados se observan con más facilidad en los cristales líquidos, que en los sólidos. Esto está relacionado con el hecho de que en los líquidos es más fácil variar la orientación del eje óptico que en un sólido: se puede, hablando al pie de la letra, doblar y retorcer el eje.

Así, pues, nos hemos enterado de que el eje óptico es una dirección preferida, con la cual están relacionadas las peculiaridades de la propagación de la luz a través del cris-

FIG. 12. *Las deformaciones complejas pueden revelarse al iluminar un modelo transparente mediante la luz polarizada.*

tal. Para comprender estas peculiaridades, es necesario recordar las propiedades más importantes de la luz, este fenómeno milagroso de la naturaleza.

§ 4. SEIS MARAVILLAS DE LA LUZ

La emisión de la luz se produce, por ejemplo, durante una variación periódica rápida de la distancia entre cargas de signos contrarios (fig. 8). Luego la propagación de la luz que se considera habitualmente como paso de ondas electromagnéticas, puede ser representada del siguiente modo. En las proximidades de las cargas, con un período igual al de las oscilaciones de las cargas, el campo eléctrico **E** varía y produce el campo magnético **H** que cambia periódicamente; este último, a su vez, engendra un campo eléctrico alternativo pero ya a una distancia mayor de las cargas, etc. El surgimiento del campo eléctrico, al variar el campo magnético, es el fenómeno conocido de inducción electromagnética, debido al cual las turbinas de las centrales eléctricas generan corriente eléctrica. Al producirse este fenómeno, el campo rotacional **E** forma con el campo **H** el "tornillo levógiro" *(ley de Ampère)* (fig. 13, *a*). Cuando se da un fenómeno semejante, o sea, aparece el campo rotacional **H** creciendo el campo **E**, los vectores **E** y **H** forman el "tornillo dextrógiro" (fig. 13, *b*). El hecho de que los "tornillos" son diferentes, tiene un profundo sentido. En la fig. 14 se refleja el proceso de propagación de las oscilaciones electromagnéticas en distintas direcciones con respecto al eje de vibraciones del dipolo. En las zonas, situadas simétricamente a ambas partes del eje de dipolo, los vórtices surgidos del campo **E** engendran vórtices del campo **H**, los cuales extinguen el campo magnético donde éste ya existía (zona *1*), pero rellenan con él nuevas zonas *2*. Si los vórtices de ambos campos tuvieran iguales "tornillos", el campo magnético en la zona *1*, por ejemplo, podría sólo crecer ili-

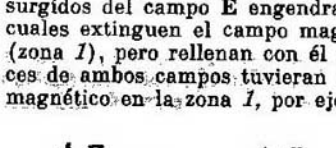


FIG. 13. *Campo rotacional electromagnético:*

a) el vórtice del campo eléctrico aparece cuando aumenta el campo magnético; *b*) el vórtice del campo magnético surge cuando aumenta el campo eléctrico.

mitadamente con el tiempo, lo que conduciría a la alteración del principio de conservación de la energía. Es preciso indicar que los vectores **E** y **H** son mutuamente perpendiculares en cualquier punto del espacio.

Polarización transversal. La onda electromagnética posee una importante propiedad de ser transversal, es decir, los vectores **E** y **H** oscilan en ella perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Queremos poner una analogía. Recordemos la fiesta multicolor de la inauguración de los Juegos Olímpicos en Moscú, en que las deportistas, hombro con hombro, formando una cadenita larga, levantaban y bajaban ante sí unos aros vistosos. Cada una de ellas lo hacía con cierto retraso respecto a su vecina. En definitiva, lo que veíamos era como corría a lo largo de la cadena una bonita onda transversal.

El carácter transversal de la luz se puede explicar del siguiente modo: el dipolo oscilante no emite ondas a lo largo de su eje. De la fig. 14 se ve que en la zona *3* en el eje del dipolo los vórtices del campo magnético, engendrados a diferentes lados de este eje extinguen por completo unos a otros. De este modo la onda no se propaga a lo largo del eje de oscilaciones de las cargas eléctricas. Pero cualquier desplazamiento de las cargas u puede siempre desarrollarse en dos componentes: uno a lo largo de la dirección de propagación de la onda y otro transversalmente a dicha dirección (fig. 15). Ahora está claro que sólo el componente transversal u origina la onda en esta dirección. La fig. 8 muestra que en cualquier dirección, perpendicular al dipolo, el campo está orientado a lo largo del eje del dipolo, lo que quiere decir que el campo **E** es perpendicular a la di-

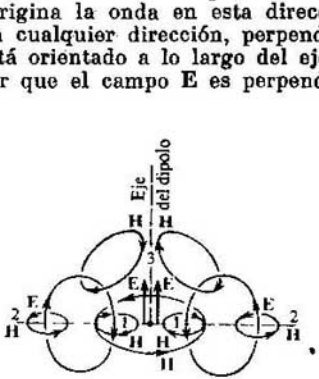


FIG. 14. *El dipolo oscilante emite un campo electromagnético.*

rección de la propagación de la onda. Respectivamente, el vector **H** está orientado en la onda tal, como lo muestra la fig. 15.

La frecuencia de las variaciones de los campos eléctrico y magnético en la onda es igual a la frecuencia de oscilaciones del dipolo. Las oscilaciones de los campos se propagan desde el dipolo con una velocidad finita, a saber, con la velocidad de la luz $c = 300\,000$ km/s y alcanza el punto de observación tanto más tarde, cuanto más lejos se encuentre éste. La distancia que pasa la onda durante un período de oscilación de las cargas T, es la longitud de la onda $\lambda = cT$ (fig. 15). La velocidad de la luz en el vacío no depende de la longitud de la onda ni de la frecuencia: es una constante universal.

Ya que es precisamente el campo eléctrico, el que ejerce la principal influencia fisiológica (sobre la retina del ojo), en lo sucesivo, al referirnos a la luz, tendremos en cuenta las oscilaciones del vector **E** en la onda electromagnética. Nuestros ojos perciben las ondas de diferentes frecuencias de distinto modo. Digamos, una luz con una frecuencia de $4 \cdot 10^{14}$ oscilaciones por segundo, la percibimos como roja, y con una frecuencia de $8 \cdot 10^{14}$ oscilaciones por segundo, violeta. En el intervalo entre éstos se sitúa toda la escala de los colores que conocemos.

En cada onda emitida por un sistema de cargas concreto, el vector **E** está orientado en el espacio de un modo bien preciso (fig. 15). Cada onda individual, como se dice, está linealmente polarizada. Pero en el rayo de luz, compuesto de muchas ondas, emitidas por distintos sistemas en diferentes momentos de tiempo, por regla general, no hay una polarización determinada. En tal rayo todas las direcciones

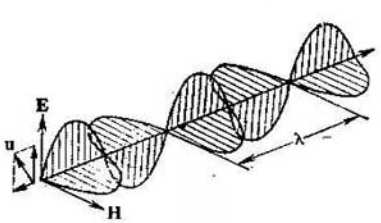


FIG. 15. *En la onda electromagnética sólo el componente transversal del desplazamiento de las cargas* u *da la aportación a la radiación*

del vector E son totalmente equiprobables. Esta luz se denomina no polarizada o natural. Para convertir la luz en polarizada, o sea, para dejar en el rayo sólo las ondas con la dirección necesaria del vector E, es necesario usar dispositivos sobre los cuales hablaremos en adelante.

En realidad, hasta ahora hemos analizado la propagación de la luz en un espacio vacío, o simplemente en el vacío. ¿Pero de qué modo las ondas luminosas atraviesan el medio compuesto de átomos y moléculas? El campo eléctrico de la onda que pasa engendra en los átomos y las moléculas dipolos variables periódicamente. Pero estas oscilaciones dipolares, a su vez, implican la emisión de la onda luminosa. Esto significa que en el medio se propagan tanto la onda primaria como las emitidas por los átomos y las moléculas bajo la acción del campo de la onda primaria.

La onda primaria atraviesa el medio por entero y las ondas secundarias se propagan a partir de cada átomo o molécula en cualquier dirección (excepto la de los ejes de los dipolos). Entonces, en resumidas cuentas, ¿qué luz ve el observador? En realidad, el observador ve en cualquier punto del espacio la acción de la suma de vectores E, engendrados en dicho punto por la onda primaria y todas las secundarias. En este caso el campo de cada onda empieza a actuar en el punto indicado con un retraso bien determinado, o sea, con una fase, ya que la luz se propaga con velocidad finita. Si continuamos la analogía con la cadenita de deportistas, el resultado de la acción de muchas ondas en cierto punto se puede comparar al efecto que se obtendrá cuando todas las cadenitas se encuentren en una persona. Las señales, es decir, el levantamiento de los aros, le llegan por las cadenitas con diferente retraso, el cual depende de la longitud de la cadenita y del momento en que se da la señal en el otro extremo de ésta. El observador que se halle donde se unen las cadenitas, debe decidir instantáneamente lo que va a hacer con el aro: levantarlo por encima de la cabeza o bien bajarlo (éstas son las desviaciones máximas que corresponden al valor máximo del campo o de la amplitud) o bien tenerlo ante sí (el campo es nulo) o bien en cualquier otra posición (valores intermedios del campo). Supongamos, de momento, que el observador es muy hábil y suma rápidamente las señales de todas las cadenitas en una común, o sea, levanta y baja su aro a un nivel igual a la suma de las señales de todas las cadenitas que han llegado en dicho momento.

Siendo muy grande el número de cadenitas, por las cuales las señales se envían en los momentos de tiempo más distintos, pero suficientemente determinados, lo más probable será que el observador no mueva una sola vez el aro de su sitio. Esto se deberá a que entre el gran número de señales que han llegado a través de las cadenitas en cualquier momento, a cada orden de "levantar" a cierto nivel, casi, sin duda alguna, se encontrará un orden de "bajar" a ese mismo nivel. Estas señales se compensan y por eso el observador no reaccionará de ninguna manera. Y sólo seleccionando de un modo especial las cadenitas según la longitud y los momentos de envío de señales podremos conseguir que las órdenes de "levantar" y "bajar" lleguen por todas las cadenitas simultáneamente. Entonces la situación de nuestra deportista no será nada envidiable, pues tendrá que levantar su aro a gran altura, si el número de tales cadenitas es muy elevado.

Estos ejemplos se refieren al fenómeno de *interferencia*. Como se sabe la interferencia es la superposición de ondas, que conduce al establecimiento en cada punto del espacio de una amplitud constante del campo. El caso más simple de la interferencia es la superposición de dos ondas. El cuadro estable de interferencia que no varía con el tiempo, aparece sólo cuando las fuentes de ondas tienen la misma frecuencia y las fases de oscilaciones no dependen del tiempo. Estas fuentes y ondas se llaman coherentes.

En un medio se produce la interferencia de las ondas electromagnéticas primaria y todas las secundarias, y el observador debe ver el cuadro correspondiente de interferencia. A base de multitud de experimentos sabemos que el rayo de luz, que incide del aire sobre una superficie lisa de un cuerpo transparente, el cual posee una densidad relativamente alta, sufre una *refracción* y *reflexión* en la superficie divisoria de dos medios. A través del cuerpo pasa el rayo refractado y en el aire está presente también, además del rayo incidente, el rayo reflejado. En este caso las direcciones de los tres rayos son distintas si la dirección del rayo incidente no coincide con la normal respecto a la superficie del cuerpo. La formación de los rayos refractado y reflejado es el resultado de la interferencia de las ondas primarias y secundarias.

Examinemos primero la causa de la refracción de la luz. La frecuencia de oscilaciones en las ondas primaria y secundaria es la misma, ya que los emisores secundarios realizan

oscilaciones forzadas con la frecuencia de la onda de la luz incidente. Si el medio está compuesto de átomos-emisores iguales que forman en el espacio un dibujo geométrico preciso con distancias fijas entre sí, el campo de cada onda adquirirá una fase constante en el punto de observación. Cuando el número de átomos y por lo tanto, de fases, es inmenso, los campos en ciertas ondas adquieren diferentes valores, con la particularidad de que para cada valor de **E** casi siempre se hallará el valor —**E**. Pero esto significa que la suma de dichos campos casi siempre es nula. Y sólo en una dirección concreta del medio las ondas pueden propagarse prácticamente de modo sincrónico (en fase) de manera que las amplitudes de éstas se suman. Esto conduce a su amplificación mutua y la formación de un nuevo rayo de luz, rayo refractado, que no coincide con el incidente. En realidad, en este caso no tratamos de elegir minuciosamente las cadenitas para el observador, sino que trasladamos a éste de un sitio a otro, hasta encontrar la dirección necesaria respecto al rayo incidente.

La existencia del rayo refractado significa que, como resultado de la interferencia, ha cambiado la dependencia del campo total **E** respecto a las coordenadas. Esta redistribución del campo electromagnético prácticamente se debe a que la velocidad de la luz en un medio v se diferencia de la velocidad de la luz en el vacío c. Es necesario subrayar que se trata precisamente de la velocidad de la luz refractada y no de la de propagación de las oscilaciones de un emisor secundario aislado; la última como siempre es igual a c. Esta circunstancia es muy importante. Claro está que cuanto más densa sea la sustancia, es decir, cuanto más emisores secundarios haya, tanto más fuertes serán los efectos de interferencia. Por lo tanto la velocidad de la luz y la refrac-

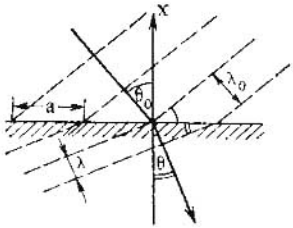


FIG. 16. *Refracción de la luz en la superficie divisoria de dos medios.*

ción de los rayos tienen que depender de la sustancia, con la particularidad de que en el medio denso los rayos deben refractarse con mayor fuerza que en el medio enrarecido.

Estos razonamientos pueden completarse con una simple fórmula matemática que describa la refracción de la luz en la superficie divisoria de los medios con diferentes densidades de la sustancia. Sea que sobre la superficie plana del cristal incide del vacío una onda, bajo un ángulo θ_0 respecto al eje x (fig. 16), y la onda refractada se propaga en el cristal bajo el ángulo θ respecto al mismo eje. Recordemos de nuevo que la frecuencia de oscilaciones $1/T$ en las ondas incidente y refractada es la misma e igual a la frecuencia de las variaciones del campo E en la onda incidente. En las líneas punteadas los vectores E tienen en un determinado momento de tiempo un mismo valor, por ejemplo, el máximo. Las distancias entre estas líneas son precisamente las longitudes de ondas en el vacío y en el cristal $\lambda_0 = cT$ y $\lambda = vT$. Pero en la propia superficie las distancias a entre los máximos de las ondas tienen que ser iguales para los dos medios, ya que los puntos de intersección de las líneas punteadas con la superficie pertenecen simultáneamente a los dos medios. Por eso resulta que $a = \lambda_0/\operatorname{sen}\theta_0 = \lambda/\operatorname{sen}\theta$ ó

$$\frac{\operatorname{sen}\theta_0}{\operatorname{sen}\theta} = \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{c}{v} = n.$$

Esta es precisamente la ley de refracción de la luz, donde n es el índice de refracción de la luz en el cristal.

Cuanto más denso es el medio, tanto menor es la velocidad de la luz v y como consecuencia tanto mayor es el índice de refracción de rayos n. El aire también refracta la luz, aunque débilmente: el índice de refracción del aire es próximo a la unidad. Los rayos solares, atravesando la atmósfera, se curvan notoriamente en las capas bajas (más densas) del aire. Como resultado de ello vemos el Sol antes de que realmente aparezca en el horizonte (fig. 17, *a*). Son preciosos los cuadros de la superficie fría y templada del mar, cuando las capas bajas del aire resultan más (fig. 17, *b*) o menos densas (fig. 17, *c*) que las altas. El mar frío aleja el horizonte y aparenta un tazón enorme, en el cual navegan barcos que en condiciones habituales se encuentran fuera del alcance de nuestra vista. Y al contrario, el mar templado aproxima considerablemente el horizonte, y parece que la curvatura de la Tierra aumenta.

Todos saben qué útiles son las lentes, merced a su ca-

pacidad de recoger los rayos de luz en un punto. Esto también representa un ejemplo de refracción de la luz, pero sobre una superficie curvada. Eligiendo una forma conveniente de la superficie del cristal, se pueden reunir rayos paralelos en un punto, o sea, en el foco, situado en el eje de la lente (fig. 18). El héroe de la novela de Julio Verne "La isla misteriosa" confeccionó una lente de cristales de reloj, llenando el espacio entre ellos de agua y luego encolándolos.

A cada longitud de onda λ le corresponde su velocidad de la luz y su índice de refracción n, con la particularidad de que n aumenta al disminuir λ. Esta es la causa de una mayor desviación de los rayos azules por el prisma en comparación con los rojos. El diamante, uno de los materiales más duros conocidos, por el hombre, no sólo refracta fuertemente la luz sino que también posee gran diferencia de los índices de refracción para los rayos de distintos colores: $n=2{,}401$ para el color rojo y $n=2{,}465$ para los rayos violetas. Los hábiles maestros de la antigüedad transmitían de una generación a otra los secretos del pulido de los diamantes con el fin de darles una forma especial. En fin de cuen-

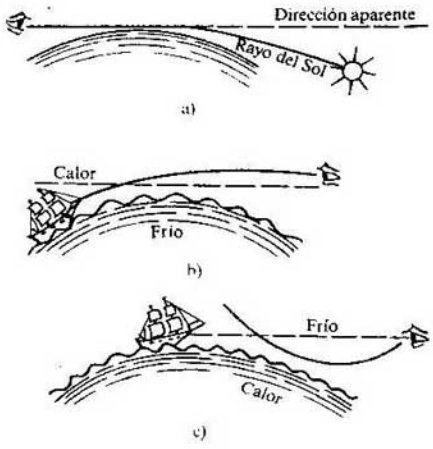


FIG. 17. *Los rayos luminosos se curvan en las capas del aire que poseen diversa densidad.*

tas los cristales tallados se convertían en piedras preciosas, porque adquirían la propiedad de dispersar fuertemente los rayos brillantes de los colores del arco iris que componen la luz blanca.

Un ejemplo más simple y no menos atractivo de este fenómeno se puede observar en un arroyo transparente, en un día de sol con viento suave que lleva ondas pequeñas. Estas ondas hacen el papel de lentes que recogen los rayos de luz en forma de franjas brillantes que se mueven junto con las ondas (fig. 19). Las franjas están coloreadas por los extremos, con la particularidad de que el extremo más cercano al Sol es azul y el más lejano, rojo. Esto también es la consecuencia de una refracción más fuerte de los rayos azules*). La semejante coloración irisada de la imagen la dan también las simples lentes, sin embargo en la técnica procuran librarse de ella mediante dispositivos ópticos especiales.

La reflexión de la luz es otra manifestación de la interferencia de ondas secundarias. El rayo de luz, reflejado de la superficie del cristal, se forma por todas ondas secundarias, emitidas por átomos y las moléculas del cristal. En realidad, otra vez tenemos el caso cuando cambia la dependencia del campo completo E de las coordenadas, pero ahora fuera del cuerpo. Con esto la velocidad de la luz no se cambia. En este caso para la ilustración vale la figura 16, pero $v=c$ y $n=1$ puesto que los rayos, el incidente y el reflejado, se encuentran en el vacío. Por eso los ángulos θ, y θ pueden ser ligados sólo por la relación $\theta = 180° - \theta_0$ (fig. 20), ya que el sen $\theta_0 = \text{sen}\ (180° - \theta_0)$. Esta es la ley conocida: "el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión".

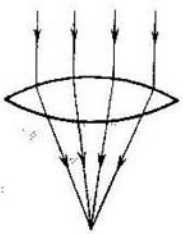


FIG. 18. *Refracción de los rayos luminosos mediante una lente.*

*) M. Minnaert. De Natuurkunde Van't Vrije Veld. Licht En Kleur In het Landschap. Hoogleraar aan de Rijksuniversiteit te Utrecht.

En el caso del medio muy enrarecido las oscilaciones de las cargas casi no influyen en el campo completo E y la reflexión del rayo luminoso de este medio prácticamente no existe. Si el medio es muy denso y la superficie de reflexión es ideal, pues es más fácil observar los rayos reflejados y los efectos ópticos relacionados con ellos. En la vida nos encontramos a menudo con la interferencia de rayos coherentes reflejados. Recordemos, por ejemplo, los colores magníficos de pompas de jabón y de las manchas de aceite de automóvil que se extienden a capas finas en el asfalto oscuro húmedo. La suma de ondas reflejadas de las superficies superior e inferior de las películas muy finas nos da estos cuadros colorados.

Con la interferencia está enlazada otra propiedad importante de la luz: *la difracción de ondas electromagnéticas*. Habitualmente se llama difracción la desviación de rayos cerca del extremo del objeto no transparente, lo que conduce a la penetración de la luz en la zona de sombra geométrica. Hablando con otras palabras las ondas pueden doblar los obstáculos. En realidad, aquí otra vez nos encontramos con los emisores secundarios y ondas secundarias, que se interfieren entre sí. Pero para observar la difracción es esencial una condición: los tamaños del obstáculo y las zonas de emisores secundarios tienen que ser comparables con la longitud de la onda. Para muy pequeños tamaños esta zona parece a una fuente puntual que emite ondas prácticamente en todas las direcciones. Miraremos algunos ejemplos.

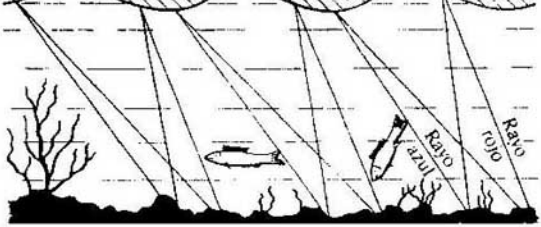


FIG. 19. *El ángulo de refracción de la luz depende de la longitud de la onda.*

En la fig. 21, *a* están mostradas dos emisores coherentes de ondas secundarias divididas por la distancia *a*. Se ve que las ondas emitidas bajo el ángulo β con respecto al rayo incidente, se amplifican mutuamente, si una se atrasa de la otra justamente a la longitud de la onda λ , o sea, cuando

$$a \text{ sen } \beta = \lambda .$$

En este caso las ondas secundarias vienen al punto de observación en fase y sus amplitudes se suman. A veces para reunir las ondas en un punto hace falta aprovechar la lente convergente.

Habitualmente el tamaño de la zona *a* es mucho más grande que la longitud de la onda λ y entonces, el ángulo β tiene que ser pequeño. De este modo la intensidad del rayo desviado es muy grande, sobre todo si los ángulos de desviación son muy pequeños. Por eso son tan bonitas las siluetas de los caminantes y árboles, alumbrados por los faroles del automóvil lejano. Lo mismo se puede decir observando miles de rozaduras pequeñas en el cristal de la ventana, que parecen situadas concéntricamente alrededor de una fuente de luz brillante. En el último caso el ojo ve sólo estos obstáculos: las rozaduras, cuyas dimensiones y la disposición responden a la condición obtenida. Además, rozaduras en la circunferencia cuyo centro está en el eje del haz de luz de la fuente lejana, se encuentran en las condiciones completamente iguales.

Si hay muchos obstáculos de pequeñas dimensiones y todos son iguales y se hallan a la misma distancia uno de otro, entonces recibimos un magnífico instrumento óptico: la red de difracción. Frecuentemente esta red constituye una fila de rendijas estrechas paralelas, divididas por tiritas no transparentes. La anchura sumaria *d* de la rendija transparente y del intermedio no transparente se llama período de la red de difracción (fig. 21, *b*).

Cuando sobre esta red incide una onda luminosa plana

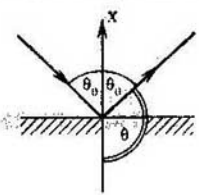


FIG. 20. *Ley de reflexión de la luz.*

todas las fuentes secundarias en las rendijas empiezan a emitir en fase y son coherentes. Las ondas secundarias se propagan por todas las direcciones y es importante saber en qué direcciones estas ondas se amplifican mutuamente. Para las ondas que se propagan de los bordes de rendijas vecinas bajo el ángulo φ con respecto al rayo incidente, la diferencia de recorridos es igual a la longitud del segmento AA' (fig. 21, *b*). Si en este segmento se mete un número entero de longitudes de ondas m, o sea, $AA' = m\lambda$, las ondas de todas las rendijas estarán en fase, amplificándose mutuamente, en tanto que

$$AA' = BB' = CC',$$

etc. Del triángulo rectangular $AA'B$ vemos que en este caso

$$d \text{ sen } \varphi = m\lambda .$$

Pues bajo de éstos ángulos φ se observarán los máximos de la intensidad de la luz. Habitualmente detrás de la red se coloca la lente convergente que enfoca ondas que van paralelas, y detrás de la lente, la pantalla instalada en el plano focal de la lente.

La red de difracción es un instrumento muy valioso, pues permite con gran exactitud medir las longitudes de ondas a partir de los valores conocidos de d y φ. Como la posición de los máximos depende de la longitud de la onda, la red descompone la luz blanca en un espectro para cada valor de m.

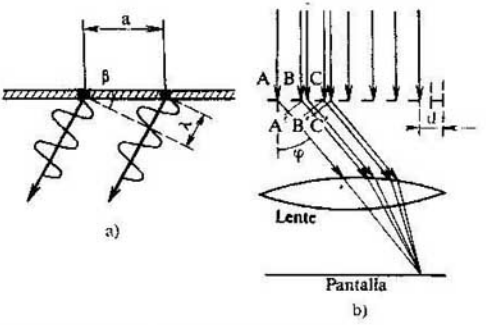


FIG. 21. *Difracción de los rayos luminosos:*
a) Difracción en un obstáculo pequeño; *b*) acción de la red de difracción

Después hablaremos más detalladamente sobre la utilidad práctica de las redes de difracción. La red de difracción natural la componen las miríadas de gotas de lluvia que reflejan y refractan los rayos de sol, suscitan la interferencia y la difracción de ellos lo que forma el resplandor magnífico del arco iris.

Dispersión de la luz. Este fenómeno se diferencia principalmente de los discutidos antes ya que su causa reside en que no son coherentes las fuentes secundarias de la luz. La cosa es que la dispersión de la luz es el resultado de la adición de las ondas secundarias que se propagan en todas las direcciones y actúan en el punto de observación sin concordancia (sin coherencia). En los medios con una densidad relativamente grande, sobre todo en los sólidos, los emisores secundarios ocupan lugares más o menos fijos y en gran medida son coherentes, es decir, emiten ondas con fases que casi no dependen del tiempo. Sin embargo, en los líquidos donde el orden de disposición de las moléculas se conserva poco tiempo, la coherencia de las fuentes no es completa. Ella está prácticamente ausente en el gas rarificado donde los emisores secundarios —las moléculas— actúan casi independientemente uno de otro en distintos momentos de tiempo y con diferentes frecuencias. En este caso no se puede decir que en cualquier lapso al punto de observación llegan ondas con fase constante. Los retrasos —las fases— pueden permanecer constantes sólo durante un tiempo corto. Este puede ser inferior al tiempo durante el cual el dispositivo ordinario percibe la acción del campo eléctrico completo. Por ejemplo, el ojo percibe el efecto de la luz durante 0,04 s *).

Así pues, si el tiempo de la reacción del dispositivo es mayor que el del efecto sincrónico de las ondas secundarias, éste registra sólo la luz difusa. Como las ondas de cada fuente se propagan en cualquier dirección, podemos observar la luz difusa en cualquier punto del medio transparente, independientemente de la dirección del rayo incidente. Es precisamente por eso que de cualquier lado se pueden ver los rayos incidente, refractado y reflejado. Por ejemplo, vemos los rayos finos de láser debido a su dispersión parcial en granos de polvo o en partículas de humo de tabaco en

*) Sólo en el caso de fuentes de la luz muy especiales —láser— para los dispositivos no hace falta exigir la rapidez de funcionamiento: todos los átomos del láser emiten simultáneamente, y el sincronismo de las ondas puede no perturbarse.

el aire. La luz difusa suele ser muy débil, por ejemplo, en el sólido y para "percibirla" se necesitan dispositivos muy sensibles. Por tanto para estimar la coherencia de la luz, es importante una reacción rápida del dispositivo, mientras que para registrar la luz difusa se requiere una sensibilidad alta del mismo.

Cualquier dispositivo y el ojo, en particular, reaccionan a la luz según su intensidad. En fin de cuentas la intensidad se determina por la energía que requiere la luz para transportar los electrones en el dispositivo. Hablando en rigor, aquí otra vez tenemos el surgimiento de dipolos bajo la acción del campo. Cuanto más grande es el campo **E**, tanto mayor es el desplazamiento de la nube electrónica en el átomo, es decir, el traslado de electrones es proporcional al campo. Pero el trabajo producido por la luz es igual a la fuerza, con la cual el campo **E** actúa sobre la carga, fuerza multiplicada por el camino que pasa el electrón. Por cuanto la fuerza que acciona sobre la carga en el campo eléctrico es proporcional al valor del campo, lo mismo que el desplazamiento del electrón, el propio trabajo es proporcional a la magnitud del campo elevado al cuadrado. Así, pues, valoramos la intensidad de la luz según la magnitud E^2.

Lo dicho es muy importante, porque la magnitud E^2 no depende de la dirección del campo **E**. Durante el tiempo de reacción de cualquier dispositivo, sobre todo del ojo, el campo en la onda electromagnética cambia su dirección inmensa cantidad de veces (aproximadamente, $5 \cdot 10^{14}$ veces por segundo). Por eso, nuestro dispositivo no registraría nada, si juzgase de la luz según la magnitud **E**: para él el valor medio de **E** sería casi nulo. Pero por suerte, la cosa no es así. En realidad los aparatos registran durante el tiempo de la reacción los valores medios del campo eléctrico total **E** elevado al cuadrado. Entonces la mayor importancia en el lugar donde se sitúa el dispositivo, tiene el cuadrado del valor máximo, o sea, el de la amplitud del campo total. Si las acciones de los emisores en el medio, cuando todos ellos permanecen en su lugar, se concuerdan estrictamente, es posible la sincronización completa de las ondas luminosas. Esto significa, que al punto de observación todas las ondas llegan en fase y sus amplitudes se suman. La amplitud del campo total es igual a la suma de amplitudes de N campos de ondas aisladas, mientras que la intensidad luminosa en el punto de observación será N^2 veces mayor que la de la onda aislada.

Si los átomos o las moléculas no permanecen quietos y no están enlazados por las fuerzas de interacción, ellos perturban la concordancia en la emisión de la luz. En algún momento el campo total **E** puede ser igual a la suma de N campos de ondas aisladas, adquiriendo sus fases valores adecuados. Pero ya que las fases varían con mucha rapidez según el tiempo, el sincronismo de ondas desaparece con celeridad. Si el sincronismo desaparece muchas veces durante la observación entonces el observador percibe las ondas luminosas dispersas, completamente por separado, y suma simplemente las intensidades de ondas aisladas. En el caso de N ondas, la intensidad común es sólo N veces mayor que la de la onda aislada. Es precisamente por eso que a menudo la luz dispersa resulta débil.

En los cristales transparentes a temperaturas bajas los átomos ocupan los lugares fijos en las redes y casi no se mueven de sus posiciones. En estas condiciones se alcanza una completa concordancia de las ondas secundarias y prácticamente no existe la dispersión de la luz, pero se propaga en una dirección especial el rayo refractado de la luz. En un gas muy rarificado falta la concordancia de las ondas secundarias y tampoco existe refracción de la luz, por eso la luz se dispersa por completo. En los líquidos y gases densos existe una concordancia y sincronización parciales de las ondas secundarias, por eso en este caso tiene lugar tanto la refracción, como la dispersión de la luz, con la particularidad de que la última posee peculiaridades interesantes.

En los líquidos y gases, en los cuales las moléculas se mueven caóticamente, sólo la distancia media entre las moléculas permanece invariable a temperatura dada. En diferentes lapsos y distintos lugares bajo la acción de choques térmicos y fuerzas de interacción molecular, las moléculas forman zonas cuyas densidades se distinguen en cierto grado del valor medio. Estas zonas existen muy poco tiempo y poseen pequeñas dimensiones, dependientes de la temperatura. Sin embargo, durante su existencia, éstas tienen tiempo para hacer aportaciones complementarias en la dispersión de la luz. En efecto supongamos que se ha formado una "concentración" donde las moléculas se encuentran a una distancia más próxima la una de la otra y los enlaces entre ellas son más fuertes. Durante el recorrido de la onda luminosa a través de esta zona las moléculas emiten ondas secundarias prácticamente en fase, si la longitud de la onda es visiblemente mayor que el tamaño de la concentración

(fig. 22). Esto conduce a una dispersión de luz más intensa que en caso de una zona rarificada, donde las moléculas emiten ondas secundarias más independientemente. Las concentraciones pueden considerarse como emisores secundarios eficaces.

La dispersión de la luz por semejantes concentraciones temporales depende de la longitud de la onda. Por ejemplo, las ondas largas (color rojo) se dispersan más débilmente que las ondas cortas (color azul). Esto se debe a que una longitud grande de la onda cabe muchas concentraciones que aparecen y desaparecen independientemente la una de la otra y por lo tanto emiten una luz con fases aleatorias (fig. 22, *a*). Para ondas más cortas la cantidad de zonas independientes desminuye y, respectipamente, se reduce el número de fases aleatorias. Por eso el aire puro en el cual las dimensiones de las concentraciones de las moléculas son muy pequeñas en comparación con las longitudes de ondas, dispersa con más intensidad las ondas cortas de la luz solar, lo que da, precisamente, al cielo el color azul vivo.

El aumento de las dimensiones y del período de vida de las zonas más densas, por ejemplo, la aparición de gotitas de agua en el aire, conduce por causas ya mencionadas a que crezca la intensidad de la dispersión de las ondas más largas. Cuando las gotas de agua en el aire, según sus dimensiones, llegan a ser comparables con las longitudes de ondas (de las rojas a las violetas), todas se dispersan casi con una misma intensidad. En este caso los colores se mezclan formando el color blanco. Por eso las nubes compuestas de gotas de agua de algunas décimas del micrómetro de

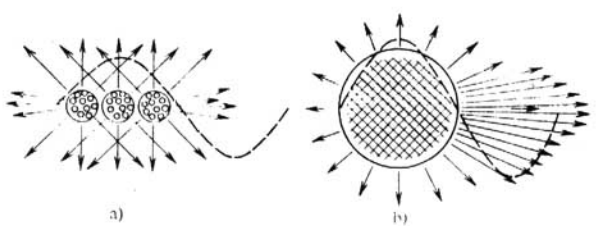


FIG. 22. *Dispersión de la luz por los granos-concentraciones de las moléculas (la onda incidente se designa por la línea de trazos):*

a) dispersión por los granos pequeños en todas las direcciones; *b*) la dispersión dirigida por los granos grandes.

dimensión, son tan deslumbrantemente blancas. A propósito, las gotas de agua grandes dispersan la luz principalmente según la dirección del paso del rayo incidente (fig. 22, *b*). Esto ocurre debido a que estas concentraciones ya se parecen más a un medio denso donde la concordancia de la emisión de ondas es mayor precisamente en esta dirección.

En los líquidos, por ejemplo, en el agua, la dispersión de la luz posee semejantes peculiaridades que en el aire. En el agua pura, la luz la dispersan las moléculas y las zonas de dimensiones pequeñas y esto es lo que les da a las profundidades de agua un color azul agradable. Si en el agua se hallan partículas en suspensión de 0,001 mm de dimensión, éstas dispersan de modo igual todos los colores. Hablando en rigor, merced al aire y espacios ácueos descubrimos la belleza armónica con muchos semitonos de los paisajes de la Tierra. En lo alto de las montañas, donde prácticamente no hay dispersión, observamos fuertes contrastes de colores, sombras de un color tinta negra y una luz deslumbrante como en los lienzos de Rerij.

§ 5. ¿DÓNDE SE PUEDE ENCONTRAR EL POLARIZADOR?

Hablaremos ahora sobre la luz polarizada, merced a la cual las observaciones ópticas resultan más interesantes. ¿De qué modo podemos obtener la luz, cuyo campo eléctrico oscila sólo a lo largo de una dirección perpendicular al rayo? Citemos ejemplos de procedimientos y dispositivos empleados para obtener la luz polarizada. En particular, la luz dispersada del cielo azul, cuando el Sol está bajo, se encuentra intensamente polarizada. Esto se comprende fácilmente. Si el Sol no asciende muy alto en el horizonte y miramos el cenit (fig. 23), el rayo del Sol y el dispersado forman casi un ángulo recto. En el cenit, el rayo solar no polarizado excita oscilaciones secundarias **E** según todas las direcciones en el plano perpendicular al rayo solar, pero paralelo al rayo dispersado. En cambio, al observador le llega sólo un rayo, el cual tiene que escoger en ese plano sólo una dirección de polarización. Merced al carácter transversal de la luz, esta dirección tiene que ser perpendicular al rayo dispersado.

Otra fuente natural de luz polarizada, es el rayo reflejado de la lámina de cristal o de la superficie de agua que forma con el rayo refractado un ángulo de 90° (fig. 24). Si el rayo incidente no está polarizado y tiene vectores **E**

perpendiculares (en la fig. 24 se dan como redondeles) y paralelos (rayas) al plano incidente (el plano de la figura), las fuentes de ondas secundarias originan un rayo de refracción, que tampoco está polarizado. En estas fuentes los dipolos oscilan a lo largo de dos direcciones coincidentes con dos polarizaciones del rayo refractado. Si el ángulo de incidencia θ_0 se escoge de modo que el rayo reflejado es perpendicular al refractado, la reflexión puede provocarse sólo mediante oscilaciones de cargas en dirección designada por el redondel. ¡Los dipolos no emiten luz a lo largo de la dirección de oscilaciones! Para el vidrio el ángulo θ_0 es aproximadamente de 60° y para el agua, de 53°. Realmente nosotros obtenemos un simple polarizador, o sea, un aparato que elige la luz linealmente polarizada. Cuando estamos observando el cenit con ayuda del espejo, sobre el cual incide el rayo dispersado bajo un ángulo $\theta \approx 60°$, el cielo en el espejo aparece oscuro, si nosotros estamos de costado al Sol (fig. 25, *a*). Si nos hallamos de cara al Sol (fig. 25, *b*), la imagen del cielo en el espejo se aclara.

Los polarizadores es mejor hacerlos de cristales sólidos aplicando las leyes que describen la propagación de la luz por el cristal. Ahora recordemos que muchos cristales poseen eje óptico. Las moléculas, como fuentes de ondas secundarias, se polarizan mediante el campo eléctrico de distinta manera, a lo largo del eje óptico y transversalmente a éste. Es decir, a lo largo del eje las cargas oscilan, bajo la acción del campo, con más fuerza que transversalmente al eje. Esto conduce a que los rayos refractados, polarizados a lo largo del eje óptico y perpendicularmente a éste, atravesarán el cristal de diferente modo. Esta diferencia está relacionada

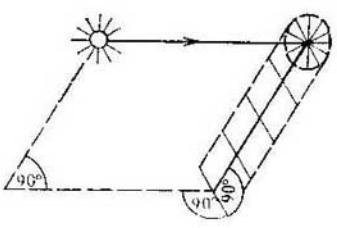


FIG. 23. *Polarización de la luz solar dispersada.*

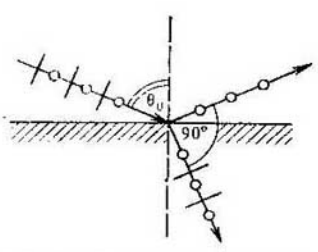


FIG. 24. *El rayo refractado es polarizado.*

con que las ondas secundarias interfieren entre sí estrictamente conforme a su polarización. En dependencia de la polarización, la luz tiene distinta velocidad de propagación y los rayos correspondientes poseen diferentes índices de refracción. Aprovechando esta particularidad, se puede construir un sistema óptico, en el cual uno de los rayos se desvía en cierta dirección mientras que el otro pasa a través del sistema permaneciendo linealmente polarizado. Existe también otro caso: la luz polarizada a lo largo del eje del cristal pasa por éste libremente y la luz, polarizada de modo perpendicular al eje, se absorbe intensamente. La lámina de este cristal deja pasar también a través de sí sólo la luz linealmente polarizada (fig. 26). El ejemplo clásico del último caso es la turmalina y las películas de polaroide son materiales más modernos.

Con ayuda del polarizador pueden verse cosas asombrosas. Ya hemos dicho que la luz, reflejada de la superficie plana del agua bajo el ángulo de 53° respecto a la perpendicular, resulta polarizada paralelamente a la superficie del agua. Si bajo este ángulo se mira al agua a través del polarizador, cuyo eje es perpendicular a la superficie, la luz reflejada no pasará a través del polarizador. En este caso a través del polarizador pasará sólo la luz difusa en la profundidad del agua y reflejada del fondo, porque ella posee cualquier polarización. Excluyendo de este modo las reflexiones superficiales, se puede ver los fondos de los charcos, como si no los hubiese, intensificar el color de las piedras

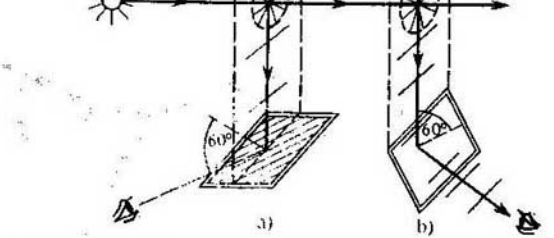


FIG. 25. *Observación de la polarización de la luz dispersada con ayuda de un espejo:*
a) el cielo parece oscuro; *b*) el cielo se aclara.

mojadas y algas, ver el mar inquieto como si estuviese arrebatado porque sólo la espuma guarda su brillo, y estando el agua tranquila, ver el resplandor azul maravilloso de la luz dispersa en la profundidad. En la práctica los polarizadores son sumamente importantes en diferentes equipos técnicos, de los cuales hablaremos en lo sucesivo.

§ 6. LA SÉPTIMA MARAVILLA DE LA LUZ

En el relato sobre los polarizadores mencionamos de hecho *la birrefringencia (doble refracción)*, es decir, distinta refracción de rayos en el cristal con el eje óptico la cual depende de la polarización de la luz. La birrefringencia al igual que la polarización transversal, la refracción simple, reflexión, interferencia, difracción y dispersión forma parte de las siete propiedades más importantes de la luz.

Supongamos que tenemos una luz polarizada. Examinemos de qué manera atraviesa la luz el cristal en dependencia de la orientación del eje óptico del mismo. Esto se comprende mejor cuando la luz incide perpendicularmente sobre la superficie del cristal. Sea el eje óptico del cristal paralelo a la superficie y constituya con la dirección de polarización de la luz un ángulo de 0° ó 90° (fig. 27). Debido a la incidencia vertical, en ambos casos el rayo de la luz pasa por el cristal sin refractarse. La polarización del rayo tampoco varía, ya que las ondas primaria y secundaria tienen la misma polarización: paralela al eje óptico en el caso (a) y perpendicular, en el caso (b). Pero las velocidades de la luz resultan diferentes, $v^{\perp}$ y $v_{\parallel}$, respectivamente. Esto no es de extrañar, puesto que el campo de la onda primaria en el caso (a) hace desplazar los electrones más que en el caso (b) (si las moléculas se polarizan más fácil en dirección de sus ejes largos). Por eso los resultados de la interferencia de las ondas primaria y secundaria son en este caso

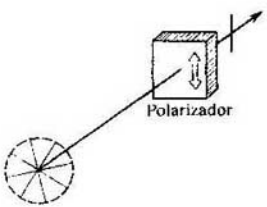


FIG. 26. *Acción del polarizador (la flecha clara representa el eje del polarizador).*

completamente diferentes. Si el eje óptico del cristal fuese perpendicular a la superficie (fig. 28), entonces la velocidad de la luz polarizada de cualquier modo, que incide a lo largo del eje, sería la misma. Es que en este caso todas las direcciones transversales al eje son completamente equitativas.

Ahora complicamos un poco nuestro experimento. Supongamos que el eje óptico del cristal, paralelo a su superficie, forma un ángulo de 45° con la dirección de la polarización de la luz (fig. 29). El vector **E** en la onda incidente tiene dos componentes: $\mathbf{E}_{\parallel}$ (paralelo al eje) y $E_{\perp}$ (perpendicular al eje). Bajo la acción de los campos $E_{\parallel}$ y $\mathbf{E}_{\perp}$, en el cristal surgen dos tipos de dipolos que emitirán ondas secundarias de una manera diferente. Estas ondas diferentes interfiriendo con la onda primaria, formarán dos rayos diferentes de luz, que pasan paralelamente a través del cristal. Las polarizaciones de estos rayos son perpendiculares mutuamente y las velocidades de la luz $v_{\parallel}$ y $v_{\perp}$ de estos rayos son diferentes. Los dos rayos, pasando a través de la lámina del cristal con velocidad diferente, salen de ésta con diferente retraso. Puede resultar que en cierto momento, al salir, $\mathbf{E}_{\perp} = 0$ y $\mathbf{E}_{\parallel}$ tenga el valor máximo (fig. 29, *a*). Entonces, en los siguientes momentos de tiempo, $\mathbf{E}_{\parallel}$ empieza a disminuir y $\mathbf{E}_{\perp}$, a crecer. Como resultado, la suma de los componentes, o sea, el vector **E**, girará con el tiempo, por ejemplo, trazando un círculo. Esta polarización se denomina circular *).

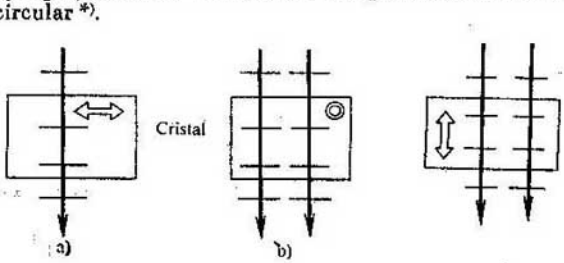


FIG. 27. *Paso de la luz polarizada a través del cristal (los ejes ópticos se muestran por una flecha clara (a) y un círculo (b)).*

FIG. 28. *Paso de la luz polarizada a lo largo del eje óptico del cristal.*

*) La polarización circular es un caso particular. En general, el extremo del vector **E** circunscribe la elipse, es decir, la polarización es elíptica.

Duplicando el espesor de la placa aumentaremos dos veces el retraso de un rayo del otro. Como resultado en el mismo momento de tiempo $E_{\perp}$ tendrá el valor máximo positivo y $E_{\parallel}$, el valor máximo negativo. En los momentos siguientes los campos $E_{\parallel}$ y $E_{\perp}$ cambiarán simultáneamente sus valores hasta cero y después cambiarán sus signos, etc. Esto significa que la suma $E = E_{\parallel} + E_{\perp}$ variará con el tiempo a lo largo de una recta. Pero esta polarización lineal estará vuelta a 90° en comparación con la polarización lineal a la entrada del cristal (fig. 29, *b*). De este modo escogiendo un cristal adecuado con eje óptico, se puede manejar la polarización de la luz, y, por ejemplo, darle vueltas. ¿Verdad, qué es interesante?

Se puede, en principio, confeccionar un sistema óptico aún más complicado poniendo las placas finas cristalinas en una pila de modo que el eje óptico de cada placa siguiente resulta vuelto en cierto ángulo pequeño α respecto a la anterior. Es necesario elegir el grosor de las placas de manera que el campo total E a la salida de cada lámina también da vuelta en un ángulo α. Entonces, a la salida de la pila la polarización de la luz se girará el ángulo de 90° respecto a la polarización de la luz incidente (fig. 30). Es verdad que técnicamente es una tarea muy difícil: las capas tienen que ser muy finas y el ángulo α, muy pequeño y todo esto exige gran precisión.

Ahora llegó el momento oportuno para hablar sobre los enigmáticos socios que observamos a través de algunos cristales. Esto también es el resultado de la birrefringencia aún más insólita. En la fig. 31 se muestra como pasan los rayos de distinta polarización a través del cristal cuyo eje óptico está inclinado. El rayo polarizado perpendicularmente al eje del cristal, atraviesa el cristal por una recta. Esto es un rayo ordinario. Está formado por la interferencia de ondas

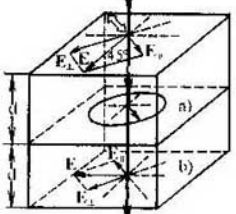


FIG. 29. *Cuando la polarización de la luz y el eje óptico del cristal forman un ángulo de 45°, puede obtenerse una polarización circular (a) o un giro de la polarización lineal en 90° (b).*

primaria y secundaria, polarizadas de una manera completamente igual, es decir, perpendicularmente al eje óptico. Otro caso es el rayo, cuya polarización está en el mismo plano con el eje del cristal. El campo de la onda incidente tiene aquí dos componentes: a lo largo del eje óptico y transversalmente a éste (están marcados con línea a trazos). Por eso en el cristal las ondas secundarias se emiten tanto a lo largo del eje como perpendicularmente a él (rayos a trazos), teniendo la luz en estas direcciones distinta velocidad ($v_{\parallel}$ y $v_{\perp}$). Es obvio, que la interferencia de estas ondas secundarias tiene que dar un rayo que se desvíe de la perpendicular. Si $v_{\perp}$ es más grande que $v_{\parallel}$, el rayo refractado se desvía precisamente del modo mostrado en la figura. A propósito, este rayo no se somete a la ley común de refracción.

El lector ya se ha dado cuenta de que todo lo que hemos dicho puede realizarse en el cristal líquido, o sea, en los líquidos que poseen eje óptico L. Las propiedades maravillosas de la luz se revelan en este caso con más evidencia. Por ahora sólo indiquemos que los cristales líquidos lo mismo que los sólidos son muy diversos. Ese tipo de cristales líquidos que hemos examinado hasta ahora (véase la fig. 10) se denomina nemático. Llamaremos a este líquido nemático simplemente nemático. Este término usado actualmente proviene de la palabra griega "hilo".

§ 7. DE LOS DEFECTOS DE ORIENTACIÓN AL NOMBRE "NEMÁTICO"

¿Cómo apareció este nombre y qué relación tienen los hilos con el cristal líquido? Esta pregunta de ningún modo

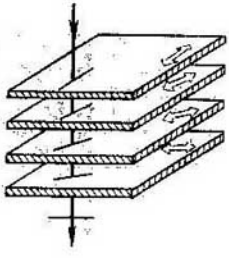


FIG. 30. *Una pila de placas finas hace girar la polarización de la luz (los ejes ópticos de las placas vecinas forman entre sí un ángulo pequeño).*

es ociosa, aunque no tendría que denominarse precisamente así el líquido extraordinario. Pero miren la fotografía típica de este líquido (véase la fig. 31a).

Se ven perfectamente los hilos finos y gruesos, que cruzan la fotografía y que en realidad dieron el término "nemático" *). Ahora la comparamos con la fig. 12. La semejanza es grande. Comprendemos que esto se provocó por cierta variación intensa de la dirección del eje óptico en el espacio. Esto pasa en el material en las inmediaciones del lugar que ha sufrido una deformación fuerte. Entonces, ¿en el líquido también hay una deformación? Sí, puede haberla. Pero es la deformación según la orientación del eje L.

En general, ya sabemos que a temperatura moderada las moléculas del cristal líquido tienden a orientarse a lo largo de una misma dirección del eje **L**. Pero depende de muchas condiciones el hecho de que el vector **L** sea igual en cada punto del espacio. Estas condiciones abarcan las fronteras exteriores e inclusiones extrañas asimismo cualesquiera acciones sobre el cristal líquido. Por eso es difícil sin motivo alguno exigir que el líquido tenga invariable la dirección de **L** en cualquier lugar. Estaría bien si las tangentes trazadas a los vectores **L** en diferentes puntos de parte separada resultaran, por lo menos, aproximadamente paralelas (fig. 32). Sin embargo, esta aproximación encierra en sí una sorpresa.

Supongamos que en la ciudad hay una pequeña plaza de

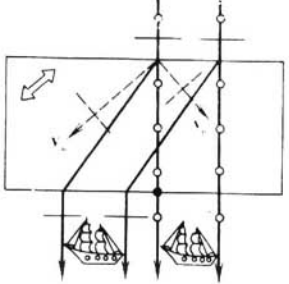


FIG. 31. *Extraordinaria birrefringencia en el espato de Islandia (la flecha clara es el eje del cristal y las rayas y redondeles, la polarización del rayo incidente y de dos rayos pasantes).*

*) Procede de la palabra griega νημα que significa hilo.

la cual se van por radios muchas calles y, además, existen carreteras de circunvalación que unen estas calles (fig. 32). Las últimas se encuentran tan densas que los tramos de las carreteras de circunvalación unen las calles vecinas casi bajo un ángulo recto respecto a las calles. Nosotros aún no sospechamos la existencia de la plaza. Estamos en la esquina A lejos de la plaza y nos preparamos a hacer un viaje por la ciudad, pasando de calle en calle, la cual es paralela a la anterior (como nos parece) por el camino más corto, o sea, por el segmento de la carretera de circunvalación. Pongámonos en camino. Está claro que por fin llegaremos a la misma esquina A aunque nos parezcan todas las calles vecinas paralelas. Siendo las calles verdaderamente paralelas, esto nunca ocurriría. Sorprendidos del resultado de este viaje podremos llegar hasta la esquina B y repetir la prueba. Sin duda alguna, el efecto será el mismo, pero ahora notaremos que damos vuelta bastante bruscamente a la izquierda. Por fin, llegando a la plaza, nos pararemos confusos, ya que veremos que las calles, en realidad, salen para diferentes partes. Pues esta situación no contradice a las leyes de la urbanización y existe en realidad: en Paris hay una plaza semejante que es la plaza de Charles de Gaulle (también la llaman "Estrella"), en cuyo centro se encuentra el famoso arco del Triunfo.

Realmente en el cristal líquido también existen tales "estrellas", cuyos rayos en cada punto son paralelos a los

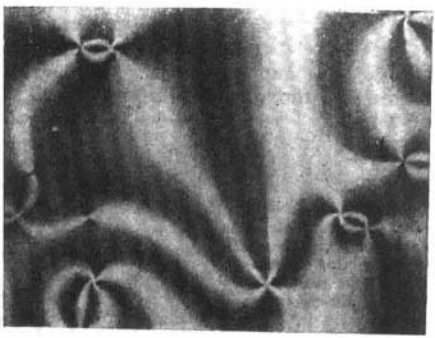


FIG. 31a. *Este es el aspecto de los "hilos" en el nemático.*

vectores **L**. Más aún, las estrellas de la orientación de las moléculas pueden ser de diferentes tipos (fig. 33). Este aspecto tienen las estrellas en dos dimensiones, es decir, en el plano. En tanto que la capa del cristal líquido tiene aun la tercera dimensión (perpendicularmente al plano de la figura), los puntos —los centros de las estrellas— se transforman en líneas. Precisamente son estas líneas o hilos los que se ven, por lo común, en el nemático. En rigor, son los defectos de la orientación del vector **L**. Y, como cualquier defecto, estos hilos son desventajosos para la comunidad de las moléculas.

En efecto, en el centro de las estrellas (y en la plaza) las moléculas vecinas (y las calles) deben cambiar muy bruscamente su orientación. En este caso unos de sus extremos tienen que unirse y los opuestos, dispersarse fuertemente. Pero esto es incompatible con el balance de las fuerzas de atracción y repulsión, gracias a las cuales existe precisamente el cristal líquido. Para encontrar alguna salida de esta contradicción, las moléculas en el mismo centro de la estrella (y las calles en la misma plaza) no se orientan de ningún modo. El hilo como si se "derritiera" en un líquido ordinario y las calles en la plaza simplemente desaparecen.

El nemático se liberaría de sus hilos, ya que sin ellos absolutamente todas las moléculas serían paralelas mutuamente, lo que es ventajoso desde el punto de vista energético. Pero esto lo impiden causas ajenas: los hilos pueden sujetarse con sus extremos a las partículas sólidas de la impureza dentro de la capa, a cualesquiera saledizos y asperezas en la superficie sólida que roza con el nemático, etc. Puede resultar que los hilos se entrelacen, formando una red, e impidan uno a otro que desaparezcan.

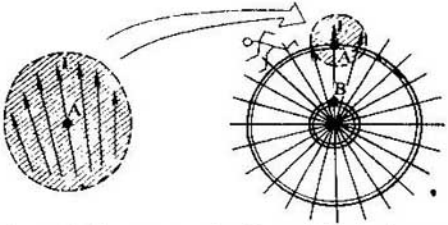


FIG. 32. *Defecto de la orientación: "estrella" de los ejes ópticos.*

La fig. 34 muestra, cómo durante el experimento se observan los defectos en la capa del nemático. En este caso es el hilo que se sujeta verticalmente a las superficies de los vidrios. Los ejes de los polarizadores por lo general los cruzan. En ausencia de defectos, cuando el eje **L** es paralelo a uno de los polarizadores, la luz a través de semejante sistema óptico no pasa y la capa del nemático parece negra (fig. 34, *a*). Pero si al campo de vista cae un hilo alrededor del cual el vector **L** cambia su orientación estrafalariamente, la luz encuentra por algunos lugares el camino a través del sistema óptico (fig. 34, *b*). Esto transcurre debido a los efectos del giro de la polarización de la luz (véase la fig. 29). Si los hilos en la capa del nemático no son rectos, sino que se tuercen y recodan, el claroscuro en la pantalla tomará las más complicadas formas.

Algunos hilos por sí mismo no son muy "sólidos". Si imaginariamente cogemos el centro de la estrella mostrada en la fig. 32 y tiramos de todo el haz de rayos perpendicularmente al plano de la figura, entonces a gran distancia de éste todos estos rayos se tornan prácticamente paralelos (fig. 35). Bueno, pues esta es la orientación más ventajosa de las moléculas. Si el nemático tiene la más pequeña posibilidad de expulsar este hilo, por ejemplo, mediante la corriente, sucede el llamado "derrame" del hilo en la tercera dimensión, es decir, perpendicularmente al plano de la estrella. Pero no todas las estrellas son tan inestables. Intente Ud, también mentalmente, tirar del centro de la estrella, mostrada en la fig. 33, *b*. Tiremos cuanto tiremos de este defecto, de todos modos su forma prácticamente se conservará: quedará obligatoriamente un "golfo" estrecho que llega hasta el centro de la estrella. Incluso podemos formular una regla simple que nos avisará qué defectos son estables y qué no. Vamos a recorrer el centro de la ciudad-estrella

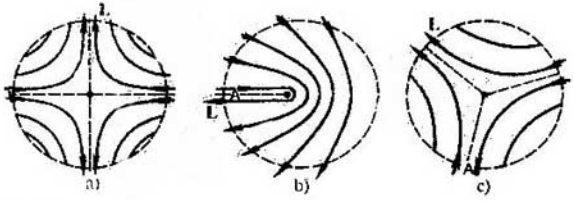


FIG. 33. *Distintos tipos de las estrellas de orientación.*

desde el punto A por un anillo. Tomemos que en cualesquiera calles vecinas, que cruzamos, la numeración de las casas crece sólo en una misma dirección L. Por el círculo llegaremos de nuevo al punto A. Y resultará que las direcciones de la numeración —los vectores L— en las calles cercanas coincidirán, como en las figs. 32 y 33, *a* o bien serán inversas, como en las figs. 33, *b* y 33, *c*. Así, pues si después de esta vuelta los vectores L son paralelos, la estrella es inestable y si son antiparalelos, el defecto es estable.

Y lo último que hay que decir aquí. Si no tomamos medidas especiales la capa fina del nemático parece turbia. El líquido ordinario en las mismas condiciones sería transparente. Esto no es casual, de ningún modo. Es que en la capa fina casi no hay moléculas. Ellas dispersan sutilmente la

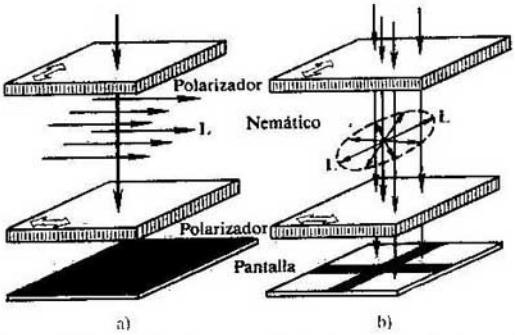


FIG. 34. *Para observar los defectos en el nemático se usan polarizadores cruzados:*

a) siendo la orientación de los ejes ópticos ideal, la pantalla no se ilumina; *b*) cuando el "hilo" en el nemático es paralelo al rayo incidente en la pantalla clara se ve una cruz oscura.

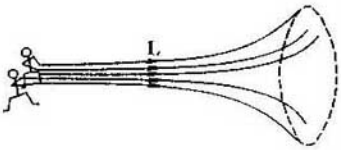


FIG. 35. *"Derrame" del defecto en la tercera dimensión.*

luz, si están débilmente unidas entre sí: la intensidad de esta luz difusa es proporcional al número de moléculas. Pero en el nemático muchas moléculas tienen la misma orientación, es decir, pueden emitir de mancomún ondas secundarias. Las dimensiones de algunos "granos" con N moléculas igualmente orientadas, alcanzan centenas de nanómetros, o sea, son zonas grandes. No hay que pensar que semejantes granos son eternos y están separados fuertemente unos de otros. Al contrario, ellos pueden existir muy poco tiempo y sus límites están muy derrubiados, es decir, estas zonas con la misma orientación de las moléculas continuamente nacen y desaparecen. Sin embargo, durante su existencia, ellos tienen tiempo de dispersar intensamente la luz. La intensidad de la luz, dispersada por los granos, es proporcional a N^2. A su vez estas zonas dispersan muy fuerte hacia adelante la luz blanca. Esto se parece a la niebla: aire con gotitas de agua.

Sin duda alguna esta dispersión no existiría si todos los granos tuvieran una misma orientación como en el cristal sólido. En condiciones habituales los choques térmicos impiden que los granos del nemático se orienten paralelamente. En cada grano todas las moléculas están orientadas del mismo modo, ya que aquí las fuerzas de atracción de las moléculas se oponen intensamente a los choques térmicos. Resulta como si la capa del nemático "se agrietase" constantemente en pedacitos con sus propias direcciones del vector L. Las "grietas" son precisamente los defectos de las orientaciones de las moléculas. Algunas grietas se "cicatrizan" con el tiempo, pero surgen nuevas, los tamaños de los granos varían permanentemente, es decir, como si el cuadro dibujado se deslizase delante de nuestros ojos. Esto ocurre en todos los casos e incluso en los cristales sólidos, cuando la relajación térmica hace competencia a las fuerzas estabilizadoras.

Capítulo II
EL EFECTO FREDERIKS

Las propiedades más impresionantes de los cristales líquidos, que han llamado tanto interés, se revelan en distintos fenómenos ópticos, insólitos para los líquidos. Estos fenómenos son propios del cristal sólido, pero ahora comprendemos el quid del asunto: el nemático, así como el cristal sólido, posee eje óptico. Pero a diferencia del cristal sólido, en el cristal líquido se puede manejar este eje utilizando diversos métodos incluso aplicando los campos eléctricos. El fenómeno de que el eje en el nemático cambia la dirección bajo la acción del campo eléctrico había sido observado ya antes de la guerra (1941—1945) por el famoso científico soviético V. K. Frederiks y ahora lleva su nombre. Es dudoso que alguien mirando hoy las indicaciones de los elegantes relojes electrónicos modernos y de las calculadoras (véase la fig. 35a) se de cuenta de que está en realidad ante este fenómeno.

§ 1. A PESAR DE TODO EL NEMÁTICO ES ELÁSTICO

Resulta que este fenómeno se observa con mayor facilidad precisamente en el nemático. Lo provoca la relativa debilidad de las fuerzas de interacción molecular en el cristal líquido. Ya hemos dicho que si no se toman medidas especiales, el nemático como si estrellase en trozos o granitos. En este caso la orientación de cada grano es hasta cierto grado casual. En efecto, no tenemos ninguna razón de considerar una u otra dirección en el nemático como la principal. Esta situación lleva a una anarquía específica entre los granos (pero no entre las moléculas en el grano). Eso quiere decir que nos hace falta ordenar de algún modo los granos en la dirección determinada necesaria para nosotros. Hay muchas maneras de hacerlo.

La manera más sencilla y segura de dar la misma orien-

tación a todas las moléculas del nemático está en pulimentar las placas de vidrio entre las cuales se colocará el nemático. Pero el pulimento del vidrio debe efectuarse en una sola dirección. Por ejemplo, se puede frotar el vidrio sin mucha fuerza con una tela en la dirección escogida. En este caso, en el vidrio se formarán surquitos, imperceptibles a simple vista y paralelos entre sí (fig. 36). Estos surquitos micrónicos tienen una profundidad y anchura de 10 a 100 nanometros.

Los granos del nemático tienen casi las mismas dimensiones. Los granos más cercanos a la superficie del vidrio interaccionan con éste según las leyes de atracción, lo que ya hemos discutido. Debido a eso los granos del nemático se pegan muy fuerte al vidrio. La cohesión de éstos con la superficie sólida es máxima siempre que ellos se depositan en los surquitos preparados paralelamente a la dirección del pulimento. Es que en este caso el acercamiento de las moléculas de los granos a la superficie del vidrio es máximo.

De este modo, un gran número de granos que se hallan inmediatos sobre el vidrio se quedan como congelados paralelamente al único eje **L** y no los puede mover de la posición ocupada ningún golpe térmico. Ahora toda la capa del nemático recibe una orden exacta de cuál orientación tiene que seguir. Las sucesivas capas finas de granos siguen la orientación de las anteriores, el proceso tiene lugar por todo el espesor del nemático. Sin embargo, siendo el espesor total muy grande, es natural que el influjo del vidrio disminuya y a grandes distancias de éste aparezcan muchísi-

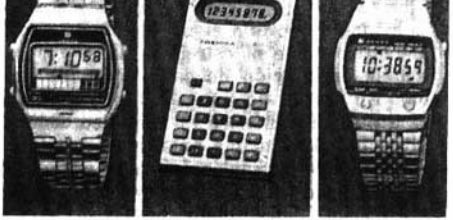


FIG. 35a. *El reloj electrónico moderno y el calculador de bolsillo a base de los cristales liquidos.*

mas "grietas" de lo que ya hemos hablado. Pero si el espesor de la capa del nemático d es de 0,01 a 0,1 milímetros podemos estar seguros de que toda la capa está orientada de la misma manera. En este caso el nemático es absolutamente transparente.

Por lo común, el proceso de orientación del nemático se realiza de la manera siguiente. Se cogen dos placas iguales de vidrio pulido, se meten entre ellas juntas de un espesor de 0,01 a 0,1 milímetros, se orientan los ejes de pulimento, por ejemplo, paralelamente uno a otro y en la holgura entre las placas se mete una gotita del nemático. He aquí donde empieza el proceso de humectación corriente, lo que ya hemos examinado anteriormente. La gota se introduce hacia adentro de esta holgura estrecha, orientándose al mismo tiempo el eje óptico **L** del nemático paralelamente al del pulimento. En cuanto a la orientación de las moléculas, obtenemos un monolito sin ninguna grieta (fig. 37, *a*).

El sistema de los ejes **L** más complicado, análogo al mostrado en la fig. 30, resulta fácil de obtenerlo en el nemático. Es necesario sólo girar 90° una de las placas de vidrio alrededor del eje z. De tal modo los ejes de pulimento de las placas formarán entre sí un ángulo de 90°. Como resultado, los ejes de los granos tratando de alinearse según las superficies de las placas harán en el espesor de la capa un giro suave de 90° (fig. 37, *b*). A propósito, es fácil de convencerse del hecho colocando nuestro sistema entre los polarizadores cruzados según está mostrado en la figura. En el caso (a) la luz no atraviesa el sistema óptico, mientras que en el caso (b) sí.

Es también interesante saber cómo se puede orientar el eje óptico del nemático de tal manera que permanezca perpendicular a las placas de vidrio. Una cosa análoga está mostrada en la fig. 28. En este caso el pulimento del vidrio no nos ayudará. Eso se consigue, como regla, de la manera siguiente. En el nemático se inyecta un número muy pe-

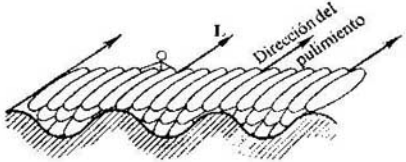


FIG. 36. *Disposición de las moléculas en una superficie pulida.*

queño de moléculas largas especiales, cuya forma es parecida a la de los renacuajos, es decir, tienen una cabeza bastante grande con dipolo eléctrico constante y una cola larga que parece a las moléculas del nemático (fig. 38, *a*). Estas dos piezas (la cabeza con dipolo y la cola larga) son de mucha importancia. La superficie del vidrio atrae fuertemente los dipolos, sobre todo si sobre ella se hallan cargas eléctricas o gotas de agua muy pequeñas. Es que las moléculas de agua también poseen dipolos constantes.

Al contrario las colas de las moléculas tienen una estructura química tal, que son completamente indiferentes al agua, a la grasa o cera. La cola es una cadena larga de átomos de carbono e hidrógeno, según lo tenemos mostrado en la fig. 38, *a*. Estas colas atraen fuertemente las moléculas largas del nemático, siendo las unas y las otras muy parecidas.

Así pues, se forma el cuadro siguiente (fig. 38, *b*): las cabezas dipolares de las moléculas que hemos inyectado se pegan al vidrio, sus colas quedan perpendiculares a la placa, las colas obligan a las moléculas cercanas que tomen posición perpendicular a la superficie del vidrio. Más allá por el espesor del nemático las órdenes de alinearse en dirección perpendicular ya las dan las moléculas del cristal líquido. Según ya nos hemos enterado, el sistema óptico dado en la fig. 38, *b* no deja pasar la luz.

Hemos efectuado una operación tecnológica necesaria y ahora tenemos a nuestra disposición una capa del nemático, cuyo eje óptico está orientado según necesitamos. Claro está, las propiedades del nemático como líquido siguen sien-

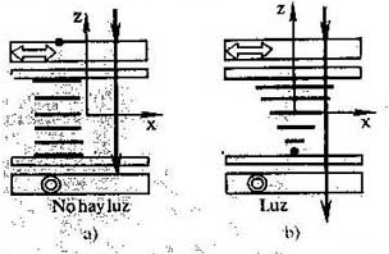


FIG. 37. *Siendo la orientación de los ejes del nemático paralela, la luz no atraviesa el segundo polarizador (a), mientras que para la orientación retorcida, lo atraviesa (b) (se muestran las proyecciones de los ejes de las moléculas sobre el plano xz).*

do sin cambiar, es decir, como siempre, puede fluir como el agua. No posee elasticidad en el sentido que damos a esta palabra hablando del muelle. Al desplazar las dos placas la una respecto a la otra no crearemos fuerzas sensibles para hacer volver las placas a su posición anterior. Además, esta afirmación significa sólo una cosa: los centros de masas de las moléculas no tienden a volver a las posiciones anteriores. Todo eso es correcto si en el sistema mostrado en la fig. 37, *a* las placas de vidrio se desplazan paralelamente la una a la otra en cualquier dirección de manera que los ejes de pulimento queden paralelos. Todo lo mismo se refiere a la fig. 38, *b* donde no existen ejes de pulimento.

Pero sería incauto declarar que el nemático en general carece de fuerzas elásticas. Sin embargo, el cristal líquido posee elasticidad y la ultima está relacionada con que en diferentes puntos del nemático el eje óptico **L** puede tener distinta orientación. Es que las moléculas tienden a permanecer mutuamente paralelas. ¿Qué efecto tendrá lugar en el caso de que por una razón u otra adquieran una orientación diferente (fig. 37, *b* y 39)? Claro está, la orientación de las moléculas resistirá a esta situación y en cuanto se elimine la causa de eso, se hará igual en cualquier lugar de la capa. Así pues, si nada les impide a las placas de vidrio en las figs. 37, *b* y 39, éstas, por la acción de las fuerzas moleculares, devendrán paralelas la una a la otra coincidiendo los ejes de pulimento.

Sin embargo, esto se realiza con mucha dificultad, pues son muy suaves las fuerzas elásticas. Por ejemplo, las placas de 1 cm^2 de área, encontrándose a la distancia de 1 cm la una de la otra, sufren la acción de fuerzas moleculares de $\sim 10^{-11}$ N. Por eso no merece hablar de la acción del nemá-

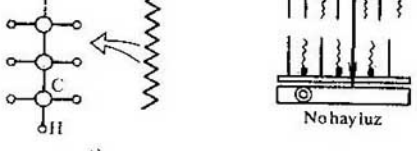


FIG. 38. *Las moléculas "renacuajos" hacen que el nemático tenga una orientación vertical:*

tico sobre las placas grandes. Pero es necesario examinar el caso cuando las placas de vidrio ocupan una posición constante (figs. 37 y 38) y en algunas partes del nemático tiene lugar la desviación del eje óptico. Entonces hasta estas fuerzas elásticas tan débiles restaurarán la dirección inicial del vector **L**.

La curvatura del eje óptico tiene cierta importancia mientras que el nemático se mete hacia adentro de la rendija estrecha entre las dos placas de vidrio en dirección paralela a la del pulimento. Como resultado el eje óptico se encorva de forma análoga a la cuerda del arco a punto de disparar la flecha, en la dirección del pulimento. Por lo tanto, la tensión superficial de la película líquida fina de la cual ya hemos hablado, aumenta en el nemático debido a las fuerzas elásticas de la orientación. Puede ocurrir que el nemático tenga una película superficial cóncava mientras que el eje óptico quede perpendicular a la dirección del movimiento y no sufre la curvatura. En este caso la tensión superficial es menor y entonces el líquido tiene que introducirse hacia adentro más despacio.

En total, todo de lo que se ha hablado aquí puede figurarse con ayuda de un modelo sencillo. Coloquemos en el espacio líneas elásticas (por ejemplo, cuerdas de acero) a lo largo de las cuales en cada punto el eje óptico permanece orientado. Pero no pongamos estas líneas muy densas para que pueda verse el dibujo. Unamos en nuestra imaginación las cuerdas transversalmente con muelles suaves e iguales. Siempre que los muelles estén en equilibrio, es decir, cuando éstas no estén contraídas ni extendidas, las cuerdas —los ejes ópticos— son paralelas en el haz. Pero si apretamos en algún lugar el haz de cuerdas, es decir, comprimimos los muelles, pondremos en acción las fuerzas elásticas de éstas que resisten a la contracción. Al contrario estirando las cuerdas en diferentes direcciones provocaremos la acción de fuerzas de compresión de los muelles, que impiden el estiramiento de éstos. Para hacer el modelo más real tendríamos que colocar el haz de cuerdas en el líquido viscoso. Sin embargo, aún es más fácil imaginarse un bosque de algas marinas largas, flexibles y pegadizas que se sujetan con sus "extremos" al fondo (fig. 40).

Ahora analicemos las estrellas, o sea, los defectos de la orientación de las moléculas, mostrados en las figs. 32 y 33. Efectivamente, los rayos de estas estrellas resultan ser ejes ópticos, es decir, cuerdas elásticas. Se ve que en los centros

de las estrellas los haces de ejes tienen máxima compresión (figs. 32 y 33, *b*) o bien, máxima extensión (figs. 33, *a* y 33, *c*). Eso quiere decir que en los alrededores de los hilos del nemático surgen fuerzas considerables de extensión y de compresión. Recordemos que en este caso los hilos pasan por los centros de las estrellas perpendicularmente al plano de las figuras. Las estrellas de extensión y de compresión se atraen la una a la otra, pues la densidad pequeña de una podría compensarse con la densidad mayor de la otra (fig. 41). Por ejemplo, con la ayuda del microscopio se puede ver cómo los dos defectos, que se muestran en las figs. 32 y 33, *a* se concentran en un punto y desaparecen. Esto evidencia de una forma convincente la existencia de las fuerzas elásticas de orientación en el nemático.

§ 2. ¿QUÉ DESPLAZAMIENTOS SUFRE EL EJE ÓPTICO POR LA ACCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO?

Hemos llegado al punto central de nuestro relato sobre el eje óptico del nemático. Tenemos que aprender a dirigir el eje según nuestros deseos. El campo eléctrico nos ayudará a hacerlo con facilidad. El campo eléctrico hace girar las moléculas oblongas y a la vez, el eje **L** de manera que el vector **L** quede permaneciendo paralelo al campo **E**, o bien perpendicular al mismo. Como norma, el eje óptico reacciona sólo de estos dos modos. La figura 42 nos explica el porqué tiene lugar ese proceso.

Sea que en la molécula del nemático el dipolo surge con facilidad alrededor de todo el eje largo y con dificultad, alrededor del corto. En otras palabras esto significa que la nube electrónica se desplaza fácilmente respecto al núcleo positivo a lo largo de la molécula y con gran dificultad transversalmente a la molécula. Si el campo eléctrico **E** y el eje **L** forman entre sí un ángulo, sólo el componente del

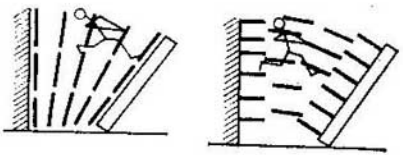


FIG. 39. *Deformaciones elásticas de orientación.*

campo **E** a lo largo del eje **L** separa las cargas en la molécula (fig. 42, *a*). Supongamos que las cargas $+Q$ y $-Q$ se alejaron la una de la otra a lo largo de la molécula a cierta distancia. Pero en este caso el campo **E** tiene que ejercer influencia en cada carga por separado con la fuerza $\mathbf{F} = \pm Q\mathbf{E}$ en la dirección del vector **E** sobre la carga positiva y con la fuerza igual en dirección contraria, es decir, sobre la carga negativa. De esa manera se forman el brazo y un par de fuerzas que crean el momento torcional. Este momento le hace sufrir desplazamiento a la molécula oblonga de tal manera que su eje largo quede orientado a lo largo del campo **E**.

Hay casos que cuando la construcción de la molécula oblonga es tal que la nube electrónica se desplaza con más facilidad a lo largo del eje transversal. Entonces sólo la proyección del campo **E** sobre el eje transversal crea el dipolo (fig. 42, *b*). En este caso la explicación sigue la misma, pero tal vez el resultado sea el siguiente: el momento torcional hace girar la molécula de tal modo que su eje longitudinal quede perpendicular al campo.

Mientras que se trata sobre los giros de una sola molécula, sería incorrecto hablar del giro del eje óptico del nemático. Los giros completamente análogos de moléculas aisladas tienen lugar también en el líquido corriente, lo que tiene poca eficacia. Pero el hecho es que en el nemático todas las moléculas, interaccionando entre sí, permanecen orientadas de un modo igual. Por eso en términos generales, es bastante empujar una de las moléculas para que las demás, de forma análoga a las fichas del dominó, todas juntas, sigan la dirección de la primera. Precisamente ésta es la causa de que es necesario aplicar pequeños esfuerzos, así como un campo eléctrico no muy fuerte para realizar un giro precisamente del eje óptico.

En el líquido ordinario que no posee eje óptico mien-

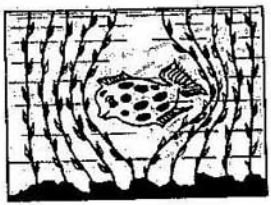


FIG. 40. *El movimiento de los ejes ópticos en el nemático se parece a la oscilación de las cuerdas o al movimiento de las algas en un líquido viscoso.*

tras no hay campo eléctrico, las moléculas también pueden sufrir desplazamientos disponiéndose paralelas las unas a las otras por la acción del campo eléctrico. Es verdad, que para conseguirlo se requiere un campo eléctrico fuerte. Sin embargo, el campo eléctrico crea en el líquido el eje óptico. Cuanto más fuerte es el campo eléctrico tanto más elástico se hace el eje óptico. Procesos análogos tienen lugar si el nemático se calienta y "se funde" en estado líquido ordinario. Pero en este caso el nemático también produce su efecto. La cosa es que el líquido ordinario, que antes representaba el nemático, guarda sobre éste cierta información en el sentido de que el líquido está compuesto de granos ya conocidos por nosotros cuya orientación permanece ahora completamente caótica (fig. 43). Pero las dimensiones de estos granos y el número de las moléculas en ellos depende a gran escala de su calentamiento. Con el aumento de la temperatura las dimensiones de los granos disminuyen. Pero si el líquido se calienta un poco más que el punto de fusión del nemático las dimensiones de los granos aun quedan bastante grandes, de unos 100 nanometros. Por eso es más fácil orientar las moléculas por la acción del campo eléctrico bajo la temperatura cercana a la de fusión que la menor que ésta.

Parece que el eje óptico del nemático puede sufrir giros por la acción de hasta el más débil campo eléctrico. Ese proceso tendrá lugar si el líquido se vierte sin límites en todas las direcciones. Pero de hecho, según sabemos, la capa del nemático debe poseer el espesor finito y la orientación firme de las moléculas en la superficie del vidrio. De este modo, el efecto de desplazamiento por el campo eléctrico se contrapone al de la estabilización por las fuerzas elásticas. Realmente el desplazamiento del eje óptico en la capa del nemático empieza si el momento torsional de las fuerzas eléctricas es igual o mayor que el momento de retorno de las fuerzas elásticas. Por eso para el nemático existe el umbral de campo o el de diferencia de potencial entre los electrodos bastante fijo, si éste se eleva, el eje óptico ya se dirige con facilidad.

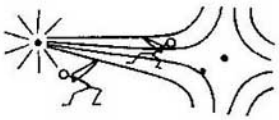


FIG. 41. *Concentración de los defectos de distinto signo en el nemático.*

En la fig. 44 se muestra que se puede hacer con la orientación del nemático en el campo eléctrico por encima del umbral si por debajo de éste los ejes ópticos están orientados de forma análoga a la presentada en las figs. 37 y 38. El caso (a) corresponde a la orientación inicial horizontal y a las moléculas polarizadas a lo largo del eje largo (fig. 42, *a*). El caso (b) corresponde a la orientación inicial perpendicular (fig. 38, *b*) y a las moléculas polarizadas a lo largo del eje corto (fig. 42, *b*). El caso (c) corresponde a la orientación inicial twist (en otras palabras, de torción) y a las moléculas polarizadas a lo largo del eje longitudinal.

Es obvio que en el centro de la capa el desplazamiento de los ejes ópticos es máximo y en las partes más próximas a las superficies de las placas de vidrio es mínimo lo que es natural, ya que la influencia de la capa disminuye en la profundidad de la capa. Aumentándose el campo eléctrico, los ejes ópticos sufren mayores desplazamientos y hasta giran 90° casi por todo el espesor del nemático, excepto la capa fina dispuesta cerca de la superficie, donde las moléculas quedan pegadas al vidrio. Precisamente este comportamiento del nemático se llama efecto Frederiks.

Siendo los valores de tensión moderadamente mayores que el umbral, el eje óptico adquiere una posición no horizontal ni perpendicular sino que queda algo inclinado y entonces con toda su belleza se manifiesta el fenómeno insólito de birrefringencia. Es que este proceso va acompañado de efectos de colores, en el caso de que la capa del nemático se alumbre con la luz blanca: según cambia el ángulo de inclinación de las moléculas, el nemático irisa. La causa del fenómeno es simple: tiene lugar interferencia de los rayos, uno de los cuales atraviesa el nemático perpendicu-

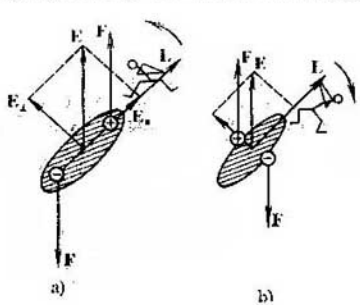


FIG. 42. *Giros de las moléculas en el campo eléctrico:*

a) el dipolo surge a lo largo del eje largo de la molécula; *b*) el dipolo surge a lo largo del eje corto de la molécula.

larmente y el otro bajo un ángulo al perpendicular, en este caso el ángulo depende de la orientación del eje óptico L. Los rayos se comportan en el nemático así como en el espato de Islandia (fig. 31). Si el haz de rayos con la polarización E_{entr} es ancho, ambos rayos polarizados en direcciones perpendiculares E_{ord} y E_{extr} (fig. 45) atraviesan el segundo polarizador siguiendo la misma dirección. A través del segundo polarizador los dos rayos marcharán al observador conservando las mismas dirección y polarización: los vectores E en ellos son iguales a las proyecciones de los vectores E_{ord} y $E_{extr\ 2}$ sobre el eje del polarizador.

Los rayos atraviesan la capa del nemático con diferentes velocidades. Por eso, según la longitud de la onda, el espesor de la capa y el ángulo de inclinación del eje L, a la salida del nemático, los rayos tienen diferentes retardos. Por ejemplo, puede tener lugar el efecto análogo al mostrado en la figura, o sea, los rayos amplificarán el uno al otro atravesando el segundo polarizador con polarización E_{sal}. En este caso el retardo del rayo extraordinario tiene que tener tal valor que los vectores $E_{extr\ 1}$ y $E_{extr\ 2}$ tengan direcciones contrarias.

Pero esta amplificación mutua puede tener lugar sólo para los rayos de un color determinado (o sea, para los de la longitud de onda determinada). Con el cambio de la orientación del eje L, varía el color del rayo intenso. Por eso con el aumento de la tensión que se aplica sobre la capa del nemático tiene lugar un cuadro tan pintoresco. Es interesante que si el primer polarizador hace eliminar la polarización $E_{extr\ 1}$ o bien la polarización E_{ord} de los rayos incidentes, el nemático lo atraviesan sólo los rayos bien ordinarios o bien extraordinarios y no tiene lugar ninguna interferencia entre ellos. De modo análogo, un sistema óptico sencillo dirigido por el campo eléctrico, puede transformar un velero blanco (fig. 31) en un bricbarca rápido de velas color escarlata. Otro ejemplo de la manifestación del fenómeno descrito, puede verse en la contraportada donde

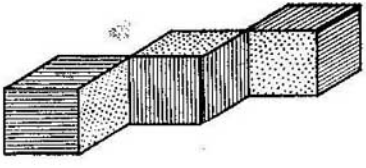


FIG. 43. *"Granos" nemáticos en un líquido ordinario.*

el ingeniero pintor (firma Toshiba) aplicando la superposición del campo eléctrico no uniforme nos muestra un camaleón cambiando su color.

Si colocamos las capas del nemático (a), (b) y (c) (fig. 44) entre los polarizadores cruzados siendo el campo eléctrico fuerte, observaremos efectos ópticos ya conocidos. En todos estos casos la luz no atravesará el sistema óptico, pues las capas del nemático prácticamente no cambiarán la polarización de ésta. De este modo en general aparece una posibilidad de dirigir la intensidad de la luz, por ejemplo, en el sistema (b) transparente en el campo eléctrico débil (fig. 37, *b*). Podríamos también aprovechar la capa (a) (fig. 44), si el eje de pulimento de las placas de vidrio forma el ángulo de 45° con los ejes de los polarizadores. En este caso es necesario escoger la capa de tal espesor que a la salida del nemático la polarización de la luz gire 90°. Este sistema óptico es completamente análogo al mostrado en la fig. 29.

La sencillez y la forma accesible de los esquemas presentados en las figuras son admirables. Se elimina un trabajo minucioso y casi de artífice que se requiere para la fabricación de los cristales sólidos para los mismos objetivos. No hace falta aplicar impulsos muy potentes del campo eléctrico para desplazar el eje óptico en el cristal sólido. En el caso del nemático, independientemente del espesor de la capa, la tensión de umbral puede ser mucho menor que un voltio y el espesor de las capas usadas aproximadamen-

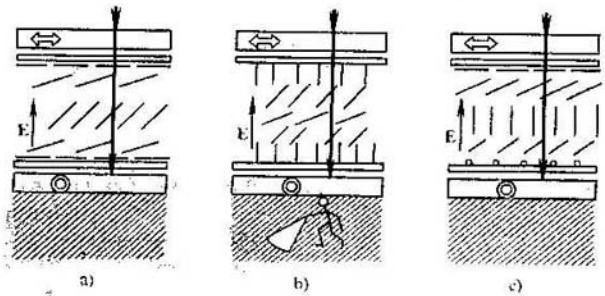


FIG. 44. *Efecto de Frederiks para diversa orientación inicial de las moléculas:*

a) orientación horizontal; b) orientación vertical; c) orientación twist.

te es igual a la centésima parte de milímetro. Es precisamente lo que condiciona un enorme interés práctico hacia los cristales líquidos al fabricar indicadores y obturadores ópticos de toda clase.

Según se ordena, los indicadores y obturadores ópticos dejan pasar o apagan las señales dadas con el rayo de luz. Por lo visto, el primero que inventó en 1876 esta puerta era el físico escocés Kerr, pero en aquel entonces utilizó el líquido corriente. Hoy el fenómeno de aparecer el eje óptico en el líquido corriente por la acción de un campo eléctrico fuerte se emplea muy ampliamente. Por ejemplo, para los obturadores se emplea nitrobenceno. Estos obturadores tienen una calidad importante. Ellos funcionan con increíble rapidez. En algunos líquidos, entre el momento de poner en función el campo eléctrico y de aparecer el eje óptico pasa el mínimo tiempo de $\sim 10^{-11}$s. Por eso los sistemas de Kerr se emplean para los casos que exigen una sobrevelocidad y exactitud: para medir la velocidad de la luz, en la fotografía ultrarrápida, para estudiar explosiones y la propagación de la llama, para dirigir los rayos láser.

La pequeña duración de la reacción del líquido corriente a la acción del campo se explica, según ya sabemos, con que cada molécula gira por separado. La resistencia contra su giro por parte de las demás moléculas es mínima. Pues con respecto a la rapidez de funcionamiento, los cristales líquidos, en general, y el nemático en particular no pueden competir, porque en el nemático actúa o bien un conjunto grande y bien organizado de moléculas, o bien el efecto de un líquido extraordinario de grano grueso. De hecho, en este caso tienen que girar a la vez millones de moléculas. Y aunque ganamos economizando energía en este giro, perde-

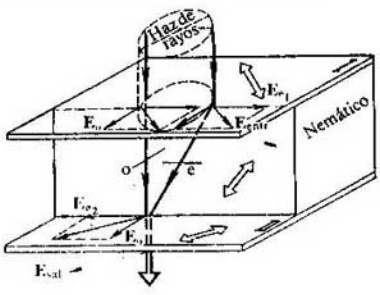


FIG. 45. *Rayos ordinario y extraordinario que atraviesan la capa del nemático, interfieren a la salida.*

mos en rapidez de su ejecución. La causa está en la viscosidad de la sustancia, lo que se manifiesta precisamente en estas grandes escalas.

Cuando establecíamos la analogía entre los ejes ópticos y las cuerdas en el medio de líquido viscoso y entre los mismos y las algas marinas (fig. 40), teníamos en cuenta precisamente este fenómeno. Los unos y las otras no pueden oscilar largo rato si se deja de aplicar la fuerza sobre ellos, pues las oscilaciones pronto extinguen a causa de la fricción (recordemos como ondulan las algas). Claro está, cuanto más fuerte es el campo eléctrico, tanto más rápido el eje óptico cambiará su dirección en el nemático. Sin embargo, actualmente los procesos más rápidos en el cristal líquido ocurren en menos de 10^{-6}s.

Hemos conocido una propiedad insólita del nemático más, o sea, la viscosidad de orientación, que impide la reacción rápida de indicadores ópticos. Afortunadamente no en todos los indicadores se exigen grandes velocidades. Por ejemplo, esto se refiere a las esferas digitales de los relojes electrónicos y a las calculadoras.

§ 3. ¿CÓMO FUNCIONA LA ESFERA DEL RELOJ ELECTRÓNICO?

Los indicadores de cristales líquidos sirven de esferas para muchos modelos modernos de relojes. La figura 46 nos muestra cómo un indicador de cristal líquido marca cifras, letras, fechas, etc. De forma análoga a la de las fig. 37, *b* y fig. 44, *c* el sistema está constituido por dos polarizadores que tienen los ejes cruzados; dos placas de vidrio pulidas, cuyos ejes de pulimento están cruzados; una capa del nemático entre las placas de vidrio que tiene que poseer orientación twist; los electrodos transparentes, aplicados sobre las placas de vidrio. Además, por debajo del polarizador inferior está puesto un espejo, que refleja la luz que cae sobre éste. El electrodo inferior es enterizo y el superior tiene forma compleja. El electrodo de forma compleja está compuesto por lo común de muchos electrodos pequeños, o sea, segmentos, de los cuales se puede formar cualquier cifra, letra o palabra. Por ejemplo, para presentar una cifra son suficientes siete segmentos. Cada segmento tiene su propio contacto eléctrico y se pone en circuito según la orden especial. El circuito eléctrico tiene alimentación de dos pilas de poca potencia (de 1,5 V cada una). Las señales

—las órdenes para cerrar el circuito con la combinación necesaria de segmentos, es decir, cifras, letras, etc.— se dan por un generador diminuto, cuyo funcionamiento determina un programa especial.

La luz diurna o de una lámpara eléctrica cae en el polarizador superior. Atravesándolo, la luz natural adquiere polarización en una dirección dada. Luego, la luz pasa a través de la placa transparente superior y penetra en la capa del nemático. La propagación de la luz en ella depende del cierre o de la desconexión del circuito eléctrico. Si el circuito eléctrico está desconectado, como ocurre en el camino del haz de la luz izquierdo (fig. 46), la orientación twist de los ejes ópticos se conserva en este lugar del nemático. Por eso según el paso del haz de la luz izquierdo a través del sistema su polarización se desvía según gira el eje óptico. A la salida de la capa del nemático y de la segunda placa de vidrio la polarización del haz izquierdo girará 90°. Pero el eje del polarizador inferior tiene la misma orientación. Por lo tanto, el haz de la luz izquierdo atravesará el segundo polarizador, llegará hasta el espejo, se reflejará en éste y hará una marcha sin obstáculos a través de todo el sistema hacia los ojos del observador. Por consiguiente, esta parte del indicador el observador la verá clara.

El haz de la luz atravesará la parte vecina derecha del indicador en el momento cuando el circuito eléctrico se conecte a la cifra 8. La luz polarizada, que llegó a la capa del nemático precisamente en los lugares donde los segmentos se conectan, se encontrará con los ejes ópticos que per-

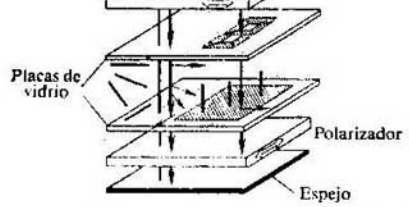


FIG. 46. *Este aspecto lo tiene el cuadrante del reloj electrónico, si se le desmonta.*

manecen perpendicularmente orientados (fig. 46). Precisamente de esta manera el campo eléctrico hace girar las moléculas que se polarizan con facilidad a lo largo del eje longitudinal. De tal modo la luz pasará a través de la capa del nemático por debajo de los segmentos de la cifra 8 sin cambiar su polarización. Pero, al atravesar el nemático y la segunda placa de vidrio, la luz tropezará con el polarizador inferior, cuyo eje es perpendicular a la polarización de la luz. Por lo tanto, el haz de la luz por debajo de los segmentos de la cifra 8 no puede pasar a través del polarizador: el polarizador o bien lo absorberá o bien lo desviará en cualquier otra dirección. Eso quiere decir que el haz derecho en los lugares de distribución de los segmentos no llegará hasta el espejo, tampoco se reflejará en el último hacia el ojo del observador. De este modo en la esfera los segmentos de la cifra 8 quedarán oscuros para el observador, es decir, que éste verá la cifra oscura sobre un fondo claro.

En los siguientes instantes de tiempo llegarán las órdenes de conectar el circuito a otras cifras o letras. Las veremos de forma análoga. Muchísimos indicadores digitales y de letras de los relojes, calculadoras, traductores electrónicos, así como escalas de los aparatos medidores y cuadrantes de sintonización, diferentes tableros, funcionan según el principio descrito. La tecnología y electrónica modernas permiten insertar calculadoras diminutas en el cuerpo de relojes elegantes, colocar relojes en los colgantos y broches. Se trata del empleo de los cristales líquidos en la vida cotidiana. Pero las pantallas de cristales líquidos (unidades de presentación visual, displays) que tienen gran número de segmentos (electrodos) y un circuito electrónico de dirección complejo, ya pueden emplearse como pantallas de televisión, tubos transformadores de imágenes (aparatos de visión nocturna), medios de dirección del rayo de luz en los sistemas de comunicación óptica, así como medios de elaboración óptica de información en ordenadores ultrarrápidos. ¿Será posible pintar la capa del nemático para obtener indicadores de color?

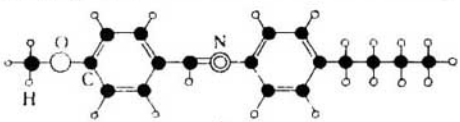
§ 4. LOS "DUEÑOS" Y LOS "HUÉSPEDES"

Partimos de la idea siguiente: disolver algún colorante directamente en el cristal líquido y estudiar cómo cambian las propiedades ópticas de esta disolución bajo la acción de la tensión aplicada. Pues, probemos. El colorante no lo ten-

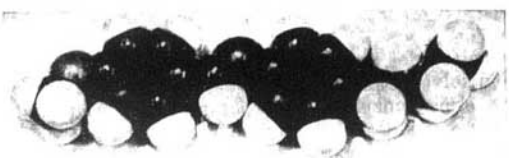
dremos que buscar: haremos uso de la tinta ordinaria color violeta, que es el colorante disuelto "violeta cristalino" en el agua. El cristal líquido se compra en el almacén de reactivos químicos. Supongamos que nos ha tocado la suerte y poseemos una sustancia que adquiere propiedades del nemático a temperaturas ordinarias (del medio ambiente). Por ejemplo, este compuesto puede ser una combinación química que de manera abreviada y en estricta concordancia con su denominación química muy larga se designa con cuatro letras mayúsculas MBBA. A temperaturas desde 21 °C hasta 47 °C esta combinación empieza a poseer propiedades del nemático. En la fig. 47 se da el esquema de la estructura de la molécula de esta sustancia y el modelo hecho con ayuda de un mecano especial muy útil para químicos y biólogos profesionales.

En total, si añadimos la tinta a la combinación MBBA, no obtendremos ningún resultado positivo, ya que la disolución acuática del colorante quedará simplemente sobre la superficie del cristal líquido. Si cogemos ese mismo colorante en polvo y lo vertemos en la MBBA, éste inmediatamente bajará al fondo de la probeta y se quedará allá para siempre.

¿Qué fenómeno tiene lugar en este caso? La cosa es que el disolvente y la sustancia a disolver tienen que poseer



a)



b)

FIG. 47. *Fórmula química de la molécula de MBBA (a) y su modelo (b).*

convenientes estructuras de sus moléculas. Como estructura se comprende tanto su forma geométrica como la disposición de cargas eléctricas en ellas. De la fig. 47 es obvio, que para la molécula del cristal líquido es característica una forma alargada. Préstese atención a que esta forma se la da el esqueleto de dos hexágonos unidos entre sí por un puente de azometina (CH=N—). Estos son anillos bencénicos compuestos cada uno de seis átomos de carbono. El carbono posee cuatro electrones de valencia con cuya ayuda se forman enlaces químicos con otros átomos. Los enlaces se designan con rayas; y cada átomo de carbono en cualquier fórmula química tiene que disponer siempre cuatro rayas (fig. 47, *a*). Además, el átomo puede compartir uno, dos o incluso tres electrones con su vecino inmediato, o sea, formar con este vecino un enlace sencillo, doble o triple. En el perímetro de los anillos bencénicos se forma una cadena de enlaces, un sencillo y otro doble que se turnan. Así pues, cada átomo de carbono está protegido del medio exterior con un átomo de hidrógeno.

Además, la molécula MBBA tiene dos "rabillos" muy móviles. A la izquierda la molécula tiene el metoxi- (CH_3O—) grupo y a la derecha el grupo butílico (C_4H_9—) de flexibilidad excepcional. Estos rabillos no poseen carga y no les gusta la proximidad de las moléculas de agua que tienen grandes dipolos eléctricos. Sería más correcto decir que es al agua que no le gusta la vecindad de éstos porque es más ventajoso que las moléculas de agua sean vecinas entre sí. Los dipolos de agua se atraen los unos a los otros formando algo análogo a una red cristalina móvil en la cual las moléculas no tienen posición fija, pero a pesar de eso están ligados entre sí de forma bastante estrecha. La molécula "huésped" que no posee carga no puede entrar en esta "red" compacta, a ella simplemente se lo impiden los "dueños".

Los colorantes que existen en forma de iones cargados pueden disolverse en el agua, pues debido a las fuerzas de Coulomb ellos consiguen incorporarse a la "red" del agua. Sin embargo, estos colorantes se disuelven mal en los solventes orgánicos, incluso en los cristales líquidos tipo MBBA. El colorante "violeta cristalino" es precisamente de esta clase (fig. 48, *a*). La molécula de este colorante posee tres anillos bencénicos que están un poco desdoblados del plano de la figura formando una "hélice". De la molécula del colorante se toma un electrón y se cede éste al cloro de manera

que el ion negativo del cloro pueda flotar en la disolución acuática con absoluta independencia del ión positivo del colorante que se queda. Pero esto se refiere sólo a la disolución acuática. Si se hace el intento de disolver el colorante en el cristal líquido, cuyas moléculas poseen pequeños dipolos constantes, no se forman los iones, pues las fuerzas de Coulomb que accionan en el disolvente no resultan suficientes para dividir el par iónico. En este caso el colorante, así como los átomos de cloro, "prefieren" quedarse en estado de cristales sólidos, lo que explica el fracaso de nuestra primera prueba no pensada bien. Pero, sin embargo, este ejemplo nos sugiere que hay que elegir el colorante y el cristal líquido partiendo del principio de su afinidad. Cuando estamos de visita en casa de nuestros parientes nos, encontramos muy cómodos como si estuviéramos en nuestra propia casa; algo parecido tiene lugar en el caso de los colorantes en el cristal líquido.

Las sustancias cuyas moléculas tienen por base los anillos bencénicos y grupos finales movibles, por ejemplo, el colorante K1 cuya fórmula se da en la fig. 48, *b*, se disuelven muy bien en los cristales líquidos. Los anillos bencénicos del colorante se unen por el puente azoico (—N=N—) y a la izquierda y a la derecha están los grupos dipolares dimetilamínicos ($N(CH_3)_2$) y nítricos (NO_2). Pero la molécula en total es neutral en el sentido eléctrico y el colorante no es iónico.

La afinidad de las estructuras de K1 y de MBBA salta

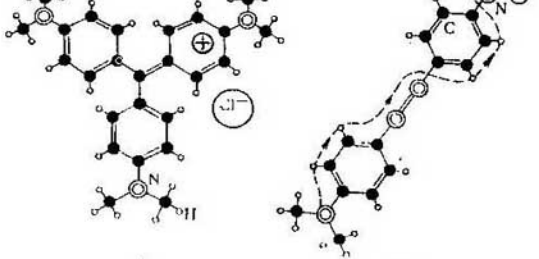


FIG. 48. *Estructura química de la molícula-huésped inconveniente (a) y conveniente (b) para el cristal líquido tipo MBBA.*

a los ojos en seguida. Por eso no es asombroso que el colorante K1 no sólo se disuelve con facilidad sino que sus moléculas se insertan fácilmente en el empaquetamiento molecular del MBBA de manera que las moléculas huéspedes (K1) permanezcan orientadas de modo igual que las moléculas del dueño (MBBA) (fig. 49). A propósito, el mismo colorante tomado por separado se funde a la temperatura alta convirtiéndose directamente en el líquido ordinario sin adquirir la forma del cristal líquido. Este efecto tiene lugar debido a la variedad especial de sus grupos finales.

En general, es justa la siguiente pregunta; ¿por qué teniendo una estructura molecular análoga, la MBBA es completamente incolora, mientras que el K1 es colorante que absorbe con intensidad la luz azul y verde y deja pasar libremente la luz roja? Es un problema muy interesante y fundamental que sirve de base para toda una dirección científica de la física y la química, la de los colorantes, en la elaboración de la cual tomaron parte los famosos científicos soviéticos, los académicos S. I. Vavílov y A. N. Terenin. Hablemos un poco sobre este tema. Esto nos ayudará a comprender mejor algunas interesantes aplicaciones prácticas.

Todas las moléculas orgánicas absorben la emisión electromagnética, pero como regla, en la parte ultravioleta del espectro donde los cuantos de luz poseen la máxima energía. Sin embargo, un gran grupo de sustancias absorbe la emisión de la más larga longitud de la onda, o sea, la luz de la banda visible. Precisamente estas sustancias son colorantes. ¿Cómo tiene que ser la molécula para absorber la luz de la onda larga?

La luz se absorbe muy bien si puede hacer oscilar a los electrones de la molécula con gran amplitud en la frecuencia

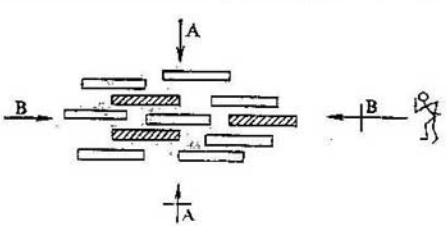


FIG. 49. *Las moléculas del colorante (sombreadas) están orientadas por las moléculas del nemático.*

luminosa. Ahora nos es necesario que la luz de frecuencia relativamente baja se absorba bien. Eso quiere decir que los electrones de la molécula tienen que balancear con facilidad en las frecuencias bajas. Cada uno de nosotros sabe que el columpio grande tiene una frecuencia de oscilaciones que no es alta y todo el atractivo del balanceo está en la amplitud grande. El mismo fenómeno tiene lugar si se trata de los electrones en la molécula. Para las oscilaciones de frecuencia baja hace falta que el campo eléctrico de la onda luminosa pueda desplazar los electrones a grandes distancias con facilidad. Por lo tanto, la molécula del colorante tiene que poseer una estructura que le asegure un fácil traslado de los electrones de un extremo de la molécula al otro. Esta facilidad se alcanza en el caso si a lo largo de todo el esqueleto molecular rígidamente alternan enlaces químicos, uno doble y otro sencillo (fig. 48, *b*, línea a rayas), pues el electrón excesivo puede saltar libremente del enlace doble al enlace vecino sencillo. La cadenita de los enlaces sencillos y dobles puede compararse hasta cierto grado con los carriles para los electrones. Además, es preferible que los grupos finales tengan relativamente grandes cargas de signos contrarios.

El papel de estos grupos finales se entiende si se imaginan los electrones en forma de pequeñas vagonetas en los carriles. Si no hay grupos cargados, las vagonetas están colocadas regularmente una tras otra a lo largo de los carriles. Los grupos finales de cargas contrarias desalojan los electrones-vagonetas a lo largo de los carriles en una dirección formando un tren de las vagonetas. En este caso la luz desempeña el papel de locomotora que mueve los electrones-vagonetas a lo largo de los carriles. Se comprende que si los electrones forman un tren y no están dispersos regularmente a lo largo de todo el camino, la amplitud de sus oscilaciones será mayor (del extremo izquierdo hasta el extremo derecho del camino) y la frecuencia correspondiente será menor. Precisamente la molécula K1 cuyos grupos NO_2 y $(CH_3)_2N$ poseen respectivamente las cargas negativa y positiva satisface todas estas condiciones.

Así como en la molécula de K1 en la MBBA se turnan enlaces dobles y sencillos, pero no hay grupos finales con cargas grandes y, como resultado, a esta molécula le falta un poco para ser colorante (ella sólo absorbe un poco la luz azul, a causa de que la sustancia tiene color algo amarillento si se mira a contra luz).

Para poder trasladar los electrones como si fuera por los carriles, el campo de la onda luminosa tiene que estar dirigido a lo largo del esqueleto molecular (es que la locomotora no puede mover el tren en dirección transversal a la de los carriles). Entonces, la molécula simple del colorante absorbe sólo el rayo de luz que cae perpendicularmente a su eje largo. Suele haber moléculas que poseen dos y más "líneas de carriles" que forman ángulos entre sí absorbiendo la luz de diferente polarización y color.

Hasta ahora hemos hablado de la absorción de la luz por los electrones, pero hay también otros absorbentes. Por ejemplo, los átomos pesados del oxígeno pueden oscilar con respecto al átomo de nitrógeno en el grupo nítrico ($-NO_2$) y estas oscilaciones absorben la luz de las ondas muy largas de la banda infrarroja. En general, todas las oscilaciones de los grupos atómicos de la molécula, lo mismo que las emisoras de radio que realizan transmisiones al éter, tienen sus bandas características de absorción de la emisión infrarroja. En este caso el campo de la onda tiene que estar dirigido a lo largo de los enlaces químicos correspondientes.

Ahora ya tenemos toda la razón para estudiar las propiedades ópticas de la disolución del colorante que se muestra de forma convencional en la fig. 49. Si la luz visible cae sobre la disolución desde arriba o desde abajo (los rayos A) y el campo de la disolución está dirigido a lo largo de la vía principal de los electrones del colorante, la luz se absorbe. Los rayos que vengan desde la derecha o la izquierda (los rayos B), no se absorberán (los rayos infrarrojos, en este caso, pueden absorberse, por ejemplo, en los lugares de los CH-enlaces de los anillos bencénicos). Los rayos de la luz visible polarizados cuyo campo eléctrico es perpendicular al plano de la figura, no se absorberán aunque caigan de arriba o de abajo. Ya que tenemos una idea bien clara de las propiedades de este sistema óptico, podemos ofrecerle al lector toda una serie de experimentos finos con moléculas de los colorantes.

Primero, prefijando la orientación del colorante con ayuda del cristal líquido y dirigiendo la luz bajo diferentes ángulos sobre la disolución podemos tomar el mapa de "ramales" de electrones y de oscilaciones de esta molécula. Es un método de mucha eficacia para el estudio de la estructura de las moléculas compuestas. Además, con ayuda de la luz láser infrarrojo muy potente se puede "dar al blanco", o sea, menear por medio del campo eléctrico precisa-

mente el enlace químico, que queremos romper, y de esta manera realizar la destrucción fotoquímica de la molécula. Mediante la luz visible, así como la ultravioleta se puede realizar análogas reacciones fotoquímicas meneando en este caso no los átomos sino los electrones. Segundo, se puede aprovechar el efecto Frederiks para girar las moléculas del colorante de manera deseada con relación al rayo de la luz.

Por ejemplo, analicemos el siguiente experimento. En la cubeta de vidrio con electrodos transparentes está el cristal líquido que tiene disuelto el colorante tipo K1 (fig. 50, *a*). El cristal líquido, así como el colorante, permanecen orientados perpendicularmente, por ejemplo, con ayuda del pulimento de las superficies de los electrodos. La luz posee polarización perpendicular, de manera que el campo eléctrico tiene orientación dirigida a lo largo de los ejes largos de las moléculas del colorante y debido a eso se absorbe por el colorante. Siendo suficiente el espesor de la capa, la luz monocroma con la longitud de la onda que corresponda a la zona de absorción del colorante se absorberá por completo.

Ahora quisiéramos conectar el campo eléctrico y cambiar la orientación del cristal líquido de manera que sus moléculas, así como las del colorante, enfilen a lo largo del rayo luminoso. Este efecto tendrá lugar cuando a lo largo del eje de la molécula del cristal líquido se coloque el dipolo grande. Por ejemplo, si en la molécula de la MBBA (fig. 47) se sustituye el rabo butílico por el grupo nitrilo (—C≡N) obtendremos precisamente el cristal líquido que nos hace falta. La conexión del campo eléctrico llevará al efecto Frederiks y el colorante obtendrá la orientación que se muestra en la fig. 50, *b*.

De este modo hemos obtenido una compuerta luminosa

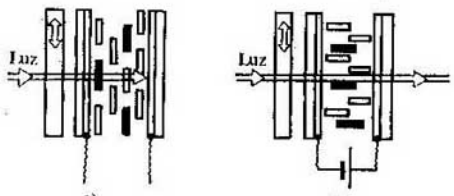


FIG. 50. *Ilustración del efecto "huesped—dueño".*
a) el campo está desconectado; *b*) el campo está conectado.

que cierra el paso o deja, pasar nuestro rayo. El efecto electroóptico correspondiente suele denominarse el efecto "huésped—dueño".

Supongamos que hay un haz de luz blanca con la dirección de oscilaciones análoga a la que está mostrada en la fig. 50. Este haz pasa parcialmente a través de la compuerta incluso si no hay campo eléctrico. El colorante "recorta" del espectro visible su parte respectiva (por ejemplo, azul) y a la salida se obtendrá el haz luminoso con el espectro acortado, o sea, pintado (en nuestro caso, rojo). La composición espectral de la luz una vez pasada por el sistema puede analizarse con ayuda del espectrofotómetro.

El espectrofotómetro es un aparato óptico cuyo elemento principal es un prisma de vidrio o de cuarzo que descompone la luz blanca en todos los colores del arco iris. Además, forma parte de éste un mecanismo, fotorreceptor, que registra la intensidad de rayos de color después de pasar a través del objeto a investigar (fig. 51). En un espectrofotómetro de alta categoría la intensidad de rayos pasados a través del objeto se compara automáticamente con la de los rayos iniciales. Como resultado, automáticamente se registra en papel la capacidad del objeto de absorber los rayos en función de la longitud de la onda luminosa y esta gráfica se llama espectro de absorción del objeto cuyo ejemplo está dado en la fig. 52. Si el espectrofotómetro graba sólo la parte de la luz absorbida por el colorante, en el caso de ausencia del campo eléctrico se ve una raya de absorción de una forma característica (curva *a*) y con el campo conectado la raya casi desaparece (curva *b*).

De emplear la luz blanca la compuerta acciona como filtro de luz dirigido por el campo eléctrico. Si en el cristal lí-

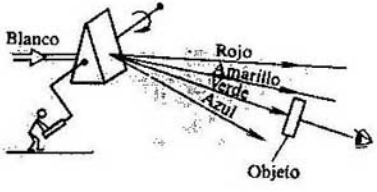


FIG. 51. *Así funciona, aproximadamente, el espectrofotómetro.*

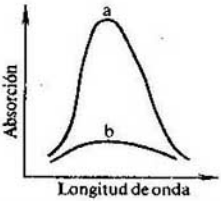


FIG. 52. *Los espectros de absorción del colorante en el cristal líquido.*

quido se disuelve un colorante muy complicado o hasta varios colorantes se puede hacer que se absorba la luz de diferentes direcciones de oscilaciones y aún en distintos lugares del espectro. Entonces, aplicando la tensión exterior al cristal líquido nosotros no sólo cambiaremos la intensidad de la luz sino que conmutaremos el color de la luz pasada. Actualmente existen colorantes, que permiten conmutar el color amarillo por lila o el rojo por violeta. Además, se puede aún evitar el uso del polarizador, o sea, trabajar con la luz blanca natural.

No es difícil de comprender que aprovechando el efecto "huésped—dueño" aparece la posibilidad de satisfacer demandas estéticas de un gran número de gente que prefiere tener relojes electrónicos, calculadoras, paneles instrumentales de los automóviles y aparatos de medición con indicadores de diferentes colores. Además, el color por sí mismo lleva información a veces muy importante, como en el caso de las instalaciones señalizadoras de emergencia. Y si a uno de los lectores le entran ganas de construir una pantalla de televisión de colores a base de los cristales líquidos recuérdese Vd. de los "*huéspedes en la casa ajena*".

§ 5. CRISTALES LÍQUIDOS Y HOLOGRAFÍA

Ya se ha hablado bastante de la holografía incluso en la literatura de divulgación científica. Por eso aquí nos limitaremos sólo al resumen más breve de lo que tiene relación al tema de nuestro libro.

La palabra griega "holografía" que despierta tanto interés, se traduce de manera muy prosaica: "apunte completo". ¿Qué es lo que se tiene en cuenta? Primero, analicemos cómo se obtiene una imagen de cualquier objeto en una corriente placa o película fotográfica. El objetivo forma la imagen del objeto en la película. En la emulsión fotográfica pasa una reacción química, que durante la revelación siguiente lleva al ennegrecimiento de la película en los lugares donde ésta quedó iluminada. Es importante que el grado de ennegrecimiento lo determina sólo la intensidad luminosa, o sea, el cuadrado de la amplitud del campo ondulatorio de la onda luminosa.

La dirección del vector del campo eléctrico de la onda tiene en este caso poca importancia puesto que la reacción química en la emulsión fotográfica es insensible al vector. La reacción química lenta tampoco tiene tiempo de seguir

los cambios rápidos del campo ondulatorio de la onda luminosa y, por lo tanto, los efectos de retardo de las ondas luminosas, que hemos estudiado en el cap. I, con ayuda del ejemplo de la cadenita de deportistas, resultan poco importantes para el método ordinario de fotografía.

Entre tanto, el retardo de la onda luminosa lleva asimismo la información acerca del objeto que emite la luz o dispersa los rayos de la fuente ajena. Por ejemplo, por el objeto se puede fácilmente determinar la distancia hasta el punto de donde salió el rayo. Pero ¿de qué manera se mide el retardo del rayo? Resulta que esto se puede efectuar, si se hace uso de un haz luminoso adicional o, como dicen, del rayo patrón emitido por la misma fuente, con que se ilumina el objeto que nos interesa. Sería mejor que éste fuera la luz láser. En la fig. 53 el rayo patrón se obtiene por medio de la reflexión directa del espejo semitransparente. Podemos unir los dos rayos (el patrón y el de señales) y ellos, como en el caso de cualquier onda, interferirán el uno con el otro. De este fenómeno hemos hablado en el § 4 del cap. I. El cuadro de distribución de la intensidad de los rayos que interfieren depende del retardo del rayo de señales con respecto al rayo patrón. Sólo queda grabar por medio del procedimiento corriente el cuadro de interferencia en la película fotográfica, y aún mejor en la placa fotográfica transparente (esto es importante para el proceso siguiente de lectura de la imagen). En total, el registro resultante nos da la información de la amplitud del rayo de señales (de esto depende el grado medio del ennegrecimiento de la emulsión fotográfica), así como de su retardo. Hemos tomado el registro completo, o sea, el holograma.

Los hologramas poseen propiedades notables. Primero, ellos se toman sin utilizar el objetivo y su vista exterior no

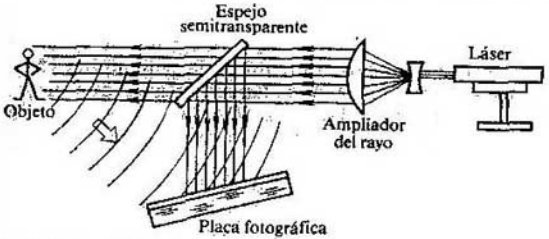


FIG. 53. *Registro del holograma.*

tiene nada en común con el objeto. La información sobre el objeto se halla en forma latente, en forma del cuadro de interferencia. Además, cada parte de la placa tiene información íntegra sobre todo el objeto. Segundo, uno puede restablecer la imagen inicial del objeto, si examina el holograma utilizando el rayo láser (no es obligatorio que la longitud de onda sea la misma que durante el registro). Además, si Ud. rompe la placa de vidrio, no se acongoje mucho, es que cada fragmento de la placa lleva la información sobre todo el objeto. Trasluciendo este fragmento con el rayo láser, Ud. podrá restaurar los contornos del objeto; en este caso la calidad será, sin duda, peor, se perderá la información sobre los detalles finos del objeto.

Se sabe que el holograma permite recibir imágenes estereoscópicas del objeto. Pero para la técnica del cálculo son mucho más importantes otras peculiaridades del registro holográfico. Primero, el registro es muy compacto (en la placa de un tamaño de 10×10 cm^2 se puede registrar más de 10 mil millones de informaciones que tienen la forma más simple de respuesta "sí" o "no"). Segundo, el registro holográfico es muy estable contra perturbaciones. Por ejemplo, si Ud. ha escrito a un amigo suyo un mensaje cifrado de mil cifras en un papel ordinario y por casualidad se ha roto un trocito de este papel con diez cifras, donde precisamente estaba indicado el sitio de su encuentro, pues es dudoso que este encuentro tenga lugar. Pero si el mismo mensaje cifrado estuviera registrado en el holograma, la pérdida de esta pequeña parte de la información significaría sólo que la calidad del registro se empeorase en un 1%, y si el registro primario ha sido de alta calidad, su encuentro tendrá lugar. La tercera ventaja del registro holográfico es la alta velocidad de su lectura con ayuda de dispositivos fotoeléctricos modernos.

Merced a estas ventajas el registro holográfico de información se utiliza en los equipos de cálculo (aparatos de memoria óptica). El principio del esquema del registro es análogo al mostrado en la fig. 53, pero en vez del objeto tridimensional se utiliza la imagen registrada en forma de texto, cuadro, gráfico, etc. Este objeto se llama transparente y el transparente más sencillo es el slide (diapositiva) ordinario alumbrado por el rayo láser. Pero el proceso de confección de los slides ordinarios como Ud. puede comprender, simultanea mal con la acción superveloz del computador. Además, es muy difícil realizar su rápido cambio mecánico.

Precisamente ahora es el momento de recordar los cristales líquidos, mediante los cuales pueden formarse imágenes bastante complicadas y después "copiarlas" o mejor dicho "leerlas" con ayuda del rayo láser, grabándolas simultáneamente en la memoria holográfica. El transparente de cristal líquido juega el papel de un convertidor de señales eléctricas, que posee el computador, en una imagen óptica que se lee por la luz láser. Dos tipos de transparentes de cristal líquido han gozado de mayor propagación.

En la primera variante, la imagen óptica en el cristal líquido se forma directamente por la señal eléctrica que llega desde el computador. La fig. 54 ilustra el modelo más simple. La capa del cristal líquido está situada, como siempre, entre dos placas de vidrio con electrodos. Uno de los electrodos (el delantero) es transparente y enterizo, el otro (el de atrás) es en sí un mosaico formado por un gran número de puntos metálicos, a cada uno de los cuales se les conecta un alambre suelto. Los alambres que van al computador están mostrados en la fig. 54. El conectar estos alambres es un trabajo muy fino, pero se encuentran especialistas que pueden hacer hasta 1000 y más de dichos contactos en el área de varios centímetros cuadrados. Lo demás es obvio. A cada punto se le comunica una señal correspondiente con respecto al electrodo transparente común y, a través del vidrio superior, puede admirarse de la imagen del texto, de la figura, etc. Utilizando el láser, se puede registrar el holograma y, al cabo de unas fracciones de segundo puede repetirse todo el proceso ya con una nueva imagen y, claro está, usando una nueva parte de la placa fotográfica.

Es compleja la confección de los transparentes mosaicos, por eso más a menudo se utiliza otra construcción en forma

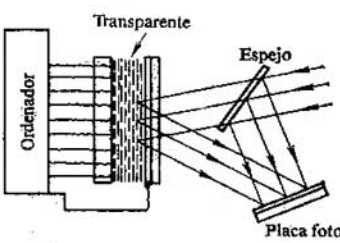


FIG. 54. *Registro del holograma desde el transparente de cristal líquido.*

de un sistema de barras eléctricas verticales y horizontales que se intersecan. El proceso de registro del holograma queda siendo el mismo y el principio de formación de las imágenes en estos sistemas (de matriz), lo estudiaremos en el párrafo siguiente.

En la otra variante el cuadro óptico primero se forma en el tubo de rayos catódicos (TRC) de la misma manera que en el televisor. Pero de este último es imposible registrar la imagen directamente en un holograma, ya que la luz de la pantalla luminiscente no sirve para este fin (esta luz no es monocroma y no tiene fase fija). Por eso se utiliza otra vez el transparente de cristal líquido; en éste la imagen se forma mediante una capa fotosemiconductora que es sensible a la luz del tubo de rayos catódicos. El esquema de este transparente se da en la fig. 55.

En este esquema la luz de la pantalla del tubo con ayuda de la lente se proyecta sobre la capa fotosensible, cuya resistencia eléctrica disminuye durante la iluminación. El fotoconductor y el cristal líquido están conectados en serie a una fuente de tensión común. En la obscuridad la capa fotográfica posee una resistencia alta y toda la tensión cae en ella. Al alumbrar, las partes claras del cuadro en el tubo corresponden a las partes claras de la imagen en la capa fotográfica y en estas partes la resistencia de la capa fotográfica disminuye. La tensión de la pila inmediatamente se reparte a favor del cristal líquido. Este último reacciona si le aplica el campo eléctrico, y cambia su orientación. Esto varía sus propiedades ópticas respecto al rayo láser incidente, el cual cambia su fase conforme a la imagen que se registra. De este modo, respecto al transparente, la luz del tubo (por lo general, de color azul) es la que registra y la luz del láser (por lo común, de color rojo) es la que lee,

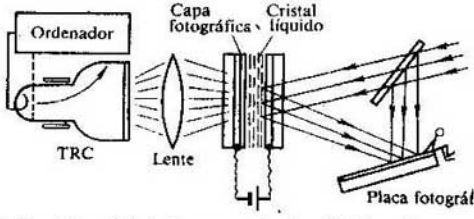


FIG. 55. *Registro del holograma desde el tubo de rayos catódicos (TRC).*

respecto al transparente, y, al mismo tiempo, es la que registra, respecto al holograma.

Prácticamente, todos los dispositivos de la memoria holográfica, que se confeccionan últimamente usan los cristales líquidos en los transparentes. Los otros materiales electroópticos por ahora están fuera de competencia: los dispositivos en los que se usan resultan más complicados y consumen gran cantidad de energía.

§ 6. EL TELEVISOR DE "BOLSILLO"

No es necesario hablar de la utilidad de la televisión a la gente de hoy; cada uno de nosotros ha pasado delante del televisor unos cuantos años de su vida. Sabemos todos cuanto más grande es la pantalla, tanto mejor se ve, mientras que las dimensiones del televisor no desempeñan ningún papel. Sin embargo, es sumamente difícil disminuirlo a pesar de todos los éxitos de la microminiaturización de los modernos circuitos de radio. El culpable es el tubo catódico de vacío que de ningún modo se consigue hacerlo plano. Además, el tubo exige una fuente de alimentación de alto voltaje. Entre tanto, los televisores portátiles son necesarios no sólo para las giras. Puede imaginarse fácilmente a un agente de la policía criminal, al cual le enseñan la fotografía que le interesa, desde el punto de dispatcher, en vez de explicarle durante largo tiempo y enredadamente por teléfono las señales particulares de la persona en cuestión. En la pantalla del televisor portátil se puede, por ejemplo, señalar las coordenadas geográficas del objeto necesarias, digamos, para un geólogo o jefe del destacamento militar. El sistema de televisión de pocas dimensiones puede servir también de telefonovídeo cómodo, etc.

Para que el televisor sea portátil, necesita tener una pantalla plana, dirigida por las tensiones eléctricas bajas (del orden de unos voltios), que se reciben de los circuitos integrados. En principio, las pantallas a base de cristales líquidos satisfacen estas condiciones. La pantalla puede funcionar, por ejemplo, con ayuda del efecto de Frederiks, ya conocido.

Para comprender el principio del funcionamiento de la pantalla de cristal líquido, primero recordemos de qué modo funciona el tubo corriente de televisión. En el tubo el haz de electrones se desvía por la horizontal y vertical mediante electroimanes a causa de lo que el rayo traza en la pantalla

líneas sucesivas una por una formando la imagen. La pantalla está cubierta por dentro con una capa de una sustancia que se ilumina bajo la acción del rayo electrónico (luminóforo). La señal de televisión dirige el valor de la corriente, transportada por el rayo electrónico, y, por lo tanto, el brillo de iluminancia de la pantalla luminiscente. La línea se traza de la izquierda a la derecha y la marcha invertida del rayo se apaga por el impulso especial. El ojo humano posee una remanencia del orden de 40 ms y el luminóforo para la pantalla está escogido de tal modo que alumbre durante 40 ms después de desaparecer el rayo electrónico del punto en cuestión. Entonces el ojo no nota el movimiento del rayo por la pantalla y percibe toda la imagen en total.

Así, pues, si la imagen se registra en 40 ms, el ojo no nota el centelleo de las imágenes. Pero la pantalla consta de 625 líneas (es el estándar de televisión). Si se divide 40 ms en 625, recibiremos unos 0,06 ms ó 60 μs. Esto significa que la línea se registrará durante este lapso de tiempo. Mas la pantalla es aproximadamente cuadrada y en una línea "caben" los mismos 600 "elementos" de la imagen, o sea, el tiempo de interacción del rayo electrónico con cada elemento es igual a 60/600, es decir, a 1 μs. En el transcurso de este lapso de tiempo tan corto el luminóforo se excita tan intensamente que después de la marcha del rayo, se desexcita durante todo el tiempo de la imagen. Esto significa que el luminóforo posee buena "memoria", la relación entre los tiempos de desconexión y de conexión es $T_d/T_c = 600 \times \times 600 = 360\,000$.

Los cristales líquidos, por desgracia, no tienen esta memoria. Por eso no se les excita por cada elemento, sino por cada línea. Con este objetivo, se confecciona un sistema de electrodos cruzados, mostrado en la fig. 56, *a*. Éste se denomina sistema de matriz, ya que se parece a una matriz algebraica, o sea, a una tabla rectangular de símbolos matemáticos. La matriz consta de X líneas e Y columnas. Su número de elementos es igual al producto XY, aunque el número de terminales es sólo la suma de $X+Y$. Préstese atención a que, siendo elevado el número de elementos, por ejemplo $X=Y=100$, tenemos sólo 200 terminales en vez de 10 000, como en el caso de la pantalla mosaica. Este es el único mérito del sistema de matriz, pero, sin embargo, ¡qué importante!

Los vidrios, como siempre, se colocan en forma de "bocadillo" (con los electrodos hacia adentro) con una holgura

de varios micrómetros de anchura que se fija mediante juntas especiales. El cristal líquido se ubica en la holgura (fig. 56, *b*). Si los vidrios están elaborados previamente para recibir la orientación retorcida, podemos observar el efecto de Frederiks descrito antes, en cualesquiera elementos de la matriz, a donde se suministrará la tensión. Para la excitación por líneas sucesivas en una de las barras horizontales (por ejemplo, N° 3) se aplica un impulso de excitación de amplitud totalmente determinada (fig. 56, *a*), y en todas las barras verticales se aplican simultáneamente los impulsos de información, que contienen datos sobre la imagen. Como resultado, todos los elementos de la línea N° 3 se encienden al mismo tiempo (se muestra por asteriscos), pero con distinta brillantez, que se prefija por las amplitudes de impulsos de información. Después el impulso de excitación se traslada a la cuarta línea y el proceso se repite. Si queremos obtener una imagen estándar de 600 líneas, debemos escribir la línea en 60 μs y conservar esta escritura durante toda la imagen. Pero a los cristales líquidos les falta un poco de remanencia para esta memoria ($T_d/T_c = 600$) y ahora se lleva a cabo un trabajo científico activo para mejorar las propiedades de los correspondientes materiales. En la actualidad ya se han fabricado televisores en blanco y negro de pequeñas dimensiones con pantallas planas a base de cristales líquidos que pueden percibir los programas corrientes de amplia teledifusión. Sin embargo, el número de líneas y de columnas en estas pantallas por ahora no alcanza el es-

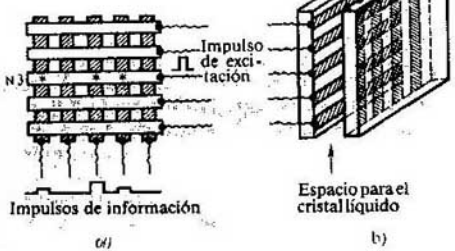


FIG. 56. *Estructura de los electrodos (a) y de la pantalla de matriz (b).*

tándar (son 120 en vez de 600), aunque la calidad de la imagen es bastante aceptable.

La fig. 57 muestra un ejemplo de la imagen, fotografiada de dicha pantalla de cristal líquido. La fotografía está hecha por científicos franceses de Grenoble, a los que no se les puede negar la presencia de humor. Realmente, es difícil determinar qué defectos de la imagen son propios del mismo Cuasimodo y cuales son producidos por la electrónica y la construcción de su pantalla *).

El mismo principio que en la pantalla de televisión se utiliza en las complejas pantallas de matriz de los diccionа-

FIG. 57. *Fotografía, obtenida de la pantalla de TV de cristal líquido.*

*) Para hoy día han sido creados más perfectos (por empresas japonesas) modelos de televisores portátiles con pantallas planas, donde en calidad de uno de los electrodos se usan placas semiconductoras opacas con elementos controladores confeccionados por la tecnología moderna de circuitos integrados. En este caso se utiliza el efecto de dispersión de la luz, sobre el cual hablaremos en el § 3 del cap. III.

rios electrónicos modernos. La fig. 58 ilustra el aspecto exterior de dicho dispositivo. Ud. tiene un computador diminuto en cuya memoria está escrita, por ejemplo, toda la información que hay en un gran diccionario inglés-ruso. Por medio del teclado en miniatura se introduce una palabra rusa e inmediatamente aparece su equivalente inglés en la pantalla de cristal líquido. Siendo la memoria grande, el diccionario electrónico puede al mismo tiempo operar con varios idiomas. Es verdad que los japoneses y chinos no han tenido suerte: es muy complicado introducir mediante el teclado los jeroglíficos, pero también en este caso el éxito final no cabe duda. En perspectiva se está meditando la sustitución de los diccionarios electrónicos por traductores electrónicos, cuando mediante el teclado no se marquen palabras sueltas, sino frases enteras. Nos quedará sólo leerlas, pero, claro que, con expresión y sin ningún acento.

Capítulo III
LAS SORPRESAS DE LA CONVECCIÓN

En el cap. I hemos hablado sobre la corriente del líquido habitual. Además, ya comprendemos que la diferencia entre el líquido habitual y el cristal líquido no es tan simple. Ahora llegó el tiempo más preciso de fantasear y ¿cómo será el "torrente" de cristal líquido? Esta pregunta no es tan fácil; en realidad puede dividirse en dos preguntas distintas. Primero, ante todo estaría bien comprender, de qué manera la velocidad de la corriente depende de la estructura de la sustancia a fluir y, segundo, cuáles serán las características ópticas del líquido corriente, si este líquido es un cristal líquido. Comencemos a estudiar el primer problema.

§ 1. ¿ESTÁ RELACIONADA LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE CON EL EJE ÓPTICO?

Al decir sí, contestamos correctamente a esta pregunta. Pero las preguntas siguientes serán más difíciles: ¿por qué

FIG. 58. *Diccionario electrónico, fabricado por una de las firmas japonesas.*

está relacionada y cómo está, precisamente? Más de 40 años atrás el físico soviético, ahora miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de la URSS, V. N. Tsvetkov ha puesto un experimento muy simple a primera vista, cuya esencia se aclara en la fig. 59. Se medía (simplemente con ayuda de un cronómetro) la velocidad de salida del cristal líquido de un capilar redondo, ubicado en la holgura de un imán bastante potente. Se investigaba una sustancia, cuya molécula está mostrada en la fig. 9, *a*. Esto es un para-azoxianisol clásico (abreviadamente PAA) que jugó en la física de los cristales líquidos el mismo papel que por ejemplo el germanio en la técnica semiconductora o la mosca droso phila en la genética.

V. N. Tsvetkov notó que al conectar el campo magnético, la velocidad de salida del cristal líquido se retrasa aproximadamente en dos veces lo que equivale al doble aumento de la viscosidad del líquido. Los experimentos especialmente puestos demostraron que el campo magnético, lo mismo que el campo eléctrico, da orientación a las moléculas del cristal líquido, con la particularidad de que alinea los ejes moleculares paralelamente a su dirección. Entonces, nos queda explicar el porqué la viscosidad depende de la dirección de la orientación de las moléculas.

Recordemos que la viscosidad es el rozamiento interno molecular en el líquido. Volvamos de nuevo al caso ya conocido, en que la placa superior se mueve y la inferior permanece inmóvil (fig. 3). Si dos capas vecinas del líquido fluyen con diferentes velocidades, el rozamiento depende de con qué facilidad las moléculas de la capa lenta pasan a la capa rápida y viceversa. Ahora examinemos la fig. 60 y

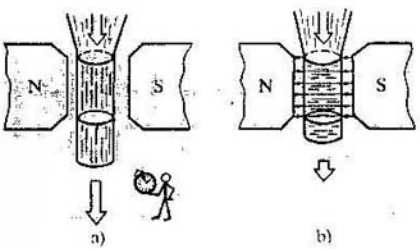


FIG. 59. *Derrame del nemático del capilar en ausencia del campo magnético (a) y al conectar el campo (b).*

pensemos ¿en qué caso a las moléculas les es más fácil irrumpirse de la capa lenta a la rápida, en el caso (a) o (b)? Quién haya introducido aunque sea una vez un clavo en una tabla con un martillo sabe que es más fácil hacerlo por la punta que poniéndolo sobre la tabla. Algo parecido tiene lugar en nuestro caso: realmente a las moléculas les es más fácil moverse a lo largo de sus ejes largos (véanse las flechas en la fig. 60, *b*), que en dirección transversal (fig. 60, *a*). Como resultado, el frenado de las moléculas rápidas va con mayor intensidad en el caso (*b*) que en el caso (*a*), y para el experimento de V. N. Tsvetkov, cuando el nemático sale, estando conectado el campo. Así, la conexión del campo aumenta el rozamiento molecular, o sea, incrementa la viscosidad.

Pero, ¿de dónde se sabe, que en ausencia del campo magnético (fig. 59, *a*), los ejes de las moléculas se orientan precisamente a lo largo del eje del capilar? Esto nos lo indica nuestra experiencia vital propia. Imaginémonos que estamos observando la conducción de armadías en un río estrecho. ¿Podemos imaginarnos la situación en que los troncos de los árboles junto a la orilla, floten quedando perpendiculares al curso del río? Claro está que los troncos darán la vuelta de modo que puedan recubrir la diferencia más pequeña de velocidades, o sea, a lo largo de la corriente. En este caso sobre el tronco actuará un momento de rotación de fuerzas mínimo. Lo mismo podemos decir sobre las moléculas alargadas de un cristal líquido que fluye. Por eso en ausencia del campo la orientación de las moléculas en el capilar será precisamente la que está mostrada en la fig. 59, *a*, si, claro está, la velocidad de la salida no será ni demasiado pequeña, ni demasiado grande. Sobre las grandes velocidades hablaremos un poco más tarde. Mientras tanto recordemos que la velocidad de la corriente del cristal líquido depende de la orientación de sus moléculas, es decir, de su eje óptico, esto es lo primero y, lo segundo, la corriente orienta sus moléculas y, por consecuencia, el eje óptico. En distintas condiciones estos fenómenos pueden manifestarse separadamente pero pueden aparecer ambos a la vez.

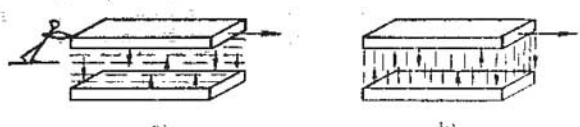
§ 2. EL ORNAMENTO DE ORIENTACIÓN

Es ya la hora de hablar otra vez sobre la convección. Conocimos este fenómeno al examinar la fig. 5, que ilustraba

el experimento clásico llevado a cabo al principio de este siglo por el científico francés Benard. Él observó un movimiento celular del líquido en caso de calentar la capa del líquido desde abajo. Al calentar desde arriba, el movimiento no surgía, de donde quedaba claro que en este fenómeno un papel muy imporante lo desempeña el campo de gravedad.

Si utilizamos un líquido habitual, es bastante difícil observar con el ojo la formación de las células mostradas en la fig. 5, ya que el ojo puede ver sólo las heterogeneidades ópticas en el líquido las cuales en este caso no están expresadas explícitamente. Es que la diferencia en el coeficiente de refracción entre las partes tibias y frías del líquido está acondicionada por la diferencia de la densidad del líquido, pero la última no depende mucho de la temperatura. Pues la misma diferencia en temperaturas entre las partes tibias y frías del líquido no es muy grande: algunas partes del grado. Benard en sus experimentos utilizaba un líquido muy exótico, a saber: espermaceti, que se encuentra sólo en los cuerpos de ballenas, y no todas, sino de cachalotes (este líquido prácticamente no se evapora durante los ensayos). Pero para nosotros es un líquido habitual, ya que no posee orden en la orientación de los ejes moleculares.

¿Qué nos dará la presencia de este orden? Invoquemos nuestra imaginación. Supongamos que tenemos un cristal líquido con moléculas orientadas como se muestra en la fig. 61, *a*. Entonces todo lo que hemos dicho sobre el líquido habitual queda en vigor; para una determinada diferencia de las temperaturas entre las superficies inferior y superior de la capa del cristal líquido, comienza el movimiento convectivo vertiginoso del líquido. Uno de los torbellinos en forma de un "rollito" largo está mostrado en la fig. 61, *a* en el momento de su "nacimiento" cuando las moléculas aún conservan su orientación inicial. Pero, examinemos qué es lo que "sienten" las moléculas en el punto A (fig. 61, *b*). Pues lo mismo que sufren los troncos que caen en un remolino del



a) b)

FIG. 60. *Frenado de las moléculas, arrastradas por la placa superior en movimiento, es más fuerte en el caso (b) que en el (a).*

rio, o sea, el momento torsor de fuerzas por parte del torbellino. La dirección de este momento depende de la dirección de la rotación del torbellino, por eso en los puntos A, B, C el viraje de las moléculas —troncos— transcurre en diferentes sentidos. Bueno y ¿por qué las moléculas no continúan su rotación, haciendo un par de vueltas como lo harían los troncos en el remolino? Pues porque aquí se termina la analogía simple. No olvidemos que "a pesar de todo el nemático es elástico". En efecto, al lado de las paredes el líquido no se mueve y allí la orientación molecular no cambia. Entonces aparece la alteración del cuadro de orientación en total que exige gastos de energía elástica. Siendo grandes los ángulos de desviación de las moléculas en los puntos A, B, C, etc., este momento de elasticidad puede ocasionar una resistencia seria al momento torsor condicionado por el movimiento del líquido y por el rozamiento molecular. Como resultado, recibiremos una orientación molecular estable, mostrada en la fig. 61, *b* para la diferencia prefijada de temperaturas entre las superficies inferior y superior. Lo que nos admira sobre todo es que las moléculas del cristal líquido, participando en el movimiento circular por las trayectorias de los torbellinos, permanecen siempre orientadas así como está mostrado en la figura.

Por supuesto, la orientación molecular surgida no retardará en manifestarse en las propiedades ópticas de la capa. Vamos a dejar pasar un rayo luminoso a través de unas placas de vidrio que limitan la capa. Entonces para la luz polarizada con el vector oscilante **E** en el plano de la figura, el índice de refracción dependerá de la distancia a lo largo del eje x (fig. 61, *b*). Esto pasa porque la molécula que está bajo un ángulo respecto al campo de la onda luminosa, no interacciona tan intensamente con el campo como aquella

FIG. 61. *Formación del "rollito" de torbellino, al calentar la capa del cristal líquido por abajo (a) y la variación de la orientación molecular en los centros de los "rollitos" (b).*

molécula, cuyo eje está a lo largo de la dirección del campo.

Además, el índice de refracción no depende simplemente de x, sino que es una función periódica de esta coordenada. Esto significa que el sistema de "rollito" se porta como una abrazadera de lentes cilíndricas colocadas una al lado de otra (fig. 62). Atravesando esta abrazadera, los rayos de luz se enfocan en finas líneas claras, entre las cuales hay parcelas oscuras.

Examinando los "rollitos" vertiginosos por el microscopio, veremos realmente la imagen de la distribución de las moléculas por las orientaciones. La alternación de las líneas oscuras y claras refleja el dibujo de orientación o el ornamento que surge en la capa del cristal líquido.

¿Qué ornamento es ése? —dirá un escéptico—, si sólo es una alternación de ciertas franjas. Sí, en este caso el ornamento es muy sencillo, pero esto es la consecuencia de una geometría muy simple, elegida especialmente para aclarar la parte esencial del asunto. Pero en realidad las diferencias de temperaturas pueden ser arbitrarias, las corrientes convectivas, bastante extravagantes y lo mismo extravagantes resultarán los dibujos de orientación y entonces los cuadros ópticos que revelan las distribuciones angulares de los ejes moleculares.

La convección térmica examinada es la más simple desde el punto de vista físico, pues es bien conocida para todos nosotros por el ejemplo de la vida de la circulación del aire en el local, originada a causa de que los tubos de calefacción están estrictamente bajo las ventanas frías (fíjese, lo mismo que en nuestro experimento con las placas). Pero para los que se interesan por las aplicaciones prácticas de los cristales líquidos, lo más intrigante será otro ejemplo de convección en el nemático. Se trata de la convección provocada por la corriente eléctrica que pasa a través del cristal líquido.

Pero primero hablaremos sobre la corriente. Para que a través de una sustancia pase la corriente, hacen falta cargas libres. Los cristales líquidos están compuestos de moléculas complejas, pero, por término medio, las moléculas orgánicas no están cargadas eléctricamente. Para recibir una molécula con carga, o sea, un ion, hace falta por lo menos arrancar de la molécula un electrón o, al revés, introducirle uno ajeno. Aunque esto no es tan fácil de hacer (para ello se necesitan energías de un orden de unidades electrón-voltios, lo que es equivalente, aproximadamente, al calentamiento de

la sustancia hasta 10 000 K), pero, a pesar de todo, estos iones, tanto positivos, como negativos, se forman. Esto pasa con más frecuencia a causa de la pérdida o adquisición del electrón por las impurezas que hay en el cristal líquido. Pero incluso si la sustancia fuera superpura, sin ninguna molécula ajena, daría lo mismo, los iones se engendrarían por ejemplo, a costa de la radiación cósmica o, lo que es más seguro, a costa de la ionización de las moleculas del mismo cristal líquido en la zona del campo eléctrico más intenso, al lado de los electrodos.

Así, pues, consideraremos que los iones existen (por lo general, en los cristales líquidos, bien purificados, hay para cada 100 millones de moléculas neutrales un ion aproximadamente). Las cantidades de cargas positivas y negativas son iguales no sólo por todo el modelo en general, sino que, si para esto no hay motivos especiales, también son las mismas en cada volumen pequeño de sustancia escogido arbitrariamente. Al cumplirse esta condición de electroneutralidad, se obtiene una ventaja de energía electrostática de interacción de los iones. Pero no siempre sucede así: pueden aparecer motivos que perturben la neutralidad. Precisamente este caso nos es interesante, pues una vez más queremos obtener imágenes de orientación, pero ahora ya sin utilizar los saltos de temperatura, sino exclusivamente a cuenta del campo eléctrico exterior.

Dirijámonos a la fig. 63, *a* y supongamos que desde el principio tenemos un cristal líquido orientado, como antes, que se encuentra ahora entre las armaduras del condensador plano eléctrico. Después, sin hablar por ahora sobre el motivo de ese fenómeno tan extraño, supongamos que los iones positivos y negativos se reúnen en grupos de "parientes", de la misma manera como está mostrado en la figura. Entonces al conectar el campo eléctrico, ocurre una cosa evidente: los iones negativos "nadan" hacia el ánodo y los iones positivos, hacia el cátodo. Pero los iones no son inmateria-

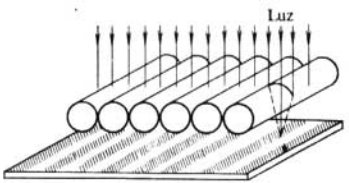


FIG. 62. *Al pasar la luz a través de una abrazadera de "rollitos", surge un cuadro óptico en forma de franjas oscuras y claras alternativas.*

les, si ellos "nadan", entonces hay una transferencia de masa del líquido, o sea, el flujo. El flujo tiene que cerrarse en algún sitio, y su geometría más natural se muestra en la fig. 63, *b*. Estos son los torbellinos convectivos ya conocidos. El movimiento de estos torbellinos se va a mantener ilimitadamente, si los iones que llegan al ánodo y cátodo, se descargan en ellos y en el volumen, en los mismos sitios, van a nacer nuevas cargas.

De este modo, los torbellinos convectivos ya existen. Entonces, después todo será como antes: otra vez obtendremos la distorsión de la orientación molecular, como en la fig. 61, *b* y por consecuencia el mismo ornamento de orientación que nos conduce al sistema de franjas oscuras y claras alternativas, que se distinguen en el microscopio polarizante.

Estas franjas las observó por primera vez en 1961 el físico soviético A. P. Kapustin y las estudió con más detalle el científico norteamericano R. Williams. La fotografía de la imagen correspondiente se puede ver en la fig. 64. Ud. debe reconocer que es muy difícil imaginarse un torbellino-"rollito" cilíndrico tan largo y fino, cuyo diámetro es igual a la anchura de una franja (algunos micrometros) y la longitud corresponde al tamaño de toda la construcción (puede llegar hasta 10 cm y más).

No sólo es agradable mirar los torbellinos-"rollitos" en el microscopio. En ellos se puede observar la difracción de la luz monocromática, ya que tenemos aquí una abrazadera de lentes cilíndricas que forman una red de difracción (fig. 62). Estas redes dirigidas por el campo eléctrico pueden utilizarse, en principio, en la técnica de láser para la desviación o la descomposición de los haces luminosos.

Las imágenes ópticas constituyen un fenómeno muy interesante, pero primero tenemos que comprender el porqué las cargas opuestas están en diferentes sitios (véase la fig. 63, a), perturbando evidentemente con ello la neutralidad

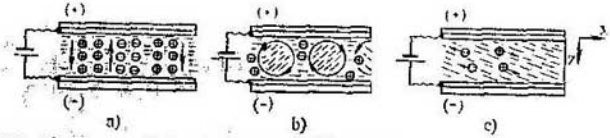


FIG. 63. *Convección en un campo eléctrico:*
a) el campo comienza a mover los grupos de los iones separados; *b)* el desplazamiento de los iones provoca un movimiento de torbellino del líquido y varía la orientación de las moléculas; *c)* la orientación molecular alterada es la causa de la separación de las cargas en el campo.

eléctrica del líquido. Examinemos este problema desde otro punto de vista. Vamos a hacer una suposición de que en ausencia del campo eléctrico hay una distorsión de las orientaciones de las moléculas tal que está mostrada en la fig. 63, *c*, pero el medio en todas las partes es neutral. Resulta que en este caso, al conectar el campo eléctrico, las cargas contrarias empiezan a separarse.

En efecto, supongamos que en algún sitio del volumen están cerca uno de otro dos iones opuestos. Al conectar el campo eléctrico, el ion positivo irá al cátodo y el negativo, al ánodo. Pero los iones no son libres escogiendo su camino, pues ya sabemos que para los iones es más fácil pasar a lo largo de los ejes moleculares que a través de ellos. Los iones van a los electrodos como si fueran por un pasillo torcido: la existencia del "pasillo" conduce a que la carga positiva se desplaza a la derecha y la negativa, a la izquierda, o sea, la existencia de la orientación alterada del cristal líquido realmente lleva a la separación de cargas.

Préstese atención a que la acción del campo eléctrico a lo largo del eje z lleva a la separación de las cargas en dirección transversal, o sea, a lo largo del eje x (fig. 63, *c*).

Pero parece que llegamos a un callejón sin salida. Para recibir la distorsión de la orientación hace falta tener un flujo, originado por las cargas separadas en el espacio. Y al contrario, para separar las cargas, hay que tener una distorsión de la orientación. ¿No nos resulta que queremos levantarnos por los pelos? Pues no, tenemos una situación cuando hay todo, menos una cosa. Nos hace falta sólo una manivela mecánica para poner en marcha todo el mecanismo. De esta "manivela mecánica" sirven las desviaciones térmicas casuales en la orientación de las moléculas. Es que las moléculas están en un estado de movimiento térmico continuo. Esto

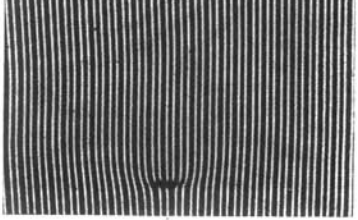


FIG. 64. *El cuadro óptico observado por A. P. Kapustin y R. Williams.*

significa que en cualquier momento puede suceder que a causa de un golpe térmico en cualquier sitio, la orientación de las moléculas se desvie sólo un poco de la inicial. Esto es suficiente para que empiece a funcionar el llamado mecanismo de reacción. Si hay un campo, la cadenita de los sucesos será así; la distorsión mínima y casual de la orientación provocará la separación mínima de las cargas; inmediatamente la deriva de las cargas en el campo conducirá a la existencia del flujo del líquido, el flujo a su vez originará la distorsión de la orientación de las moléculas. La cadenita se cerró y lo más principal es que la dirección del giro resultativo de las moléculas coincide con una pequeña desviación primaria. Se amplificó la desviación inicial. La reacción resultó ser positiva. Ahora la desviación de las moléculas y también la velocidad del líquido van a crecer hasta que otros procesos refrenen este crecimiento. Tenemos en cuenta, ante todo, las fuerzas elásticas que accionan del mismo modo como en el caso de la convección térmica. Como resultado, se establece el proceso de la rotación uniforme de los torbellinos-"rollitos".

Según el carácter de la orientación primaria del cristal líquido, la amplitud y la frecuencia del campo aplicado y las propiedades del cristal líquido, se puede observar una gran diversidad de dibujos de orientación originados por la convección del líquido. La fig. 65 ilustra los ejemplos de las imágenes ópticas correspondientes.

§ 3. LA CORRIENTE ELÉCTRICA AGITA EL NEMÁTICO

El fenómeno que hemos examinado, los físicos lo denominan inestabilidad electrohidrodinámica. Si la tensión exterior es más baja que la del umbral, el cristal líquido está en reposo. Si el campo aumenta se alcanzará el umbral de la inestabilidad, con el cual precisamente surge la corriente de torbellino del cristal líquido en forma de unas células regulares o "rollos", mostrados en la fig. 61. Si aún se aumenta un poco más la tensión, la velocidad de la circulación del líquido en los "rollos" crecerá, pero la forma de las células por ahora no cambia. Sin embargo, así no puede durar mucho tiempo.

Ya hablamos de que existe una diferencia principal en el carácter de la corriente del líquido a velocidades pequeñas y grandes. Si la tensión exterior pasa un poco la del

umbral, la corriente suave de los torbellinos-"rollos" circulares cambia por otra corriente más desordenada del líquido. Se forma una gran cantidad de embudos pequeños, remolinos, vórtices, etc. La situación es parecida a la que está mostrada en la fig. 4, *b*. Cuanto más alta es la tensión, tanto más pequeños y más desordenados son los torbellinos en que se desmenuza toda la capa del cristal líquido y, al fin y al cabo, surge un caos completo. La sucesión de los acontecimientos mostrada en la fig. 66, nos recuerda el hervir del agua en la tetera. Este movimiento caótico del líquido, en este caso el del cristal líquido, se llama turbulento.

Así resulta que el campo exterior o, mejor dicho, la corriente eléctrica, excita la sustancia de cristal líquido. Claro está que para este movimiento caótico del líquido, la orientación de las moléculas resultará también deformada de tal modo que no se le puede reconocer, o sea, intensamente heterogénea. En este caso las zonas de una orientación más o menos homogénea son muy pequeñas y tienen las dimensiones de un micrometro, o sea, son conmensurables con la longitud de la onda de luz (precisamente estas dimensiones las tienen los pequeños torbellinos en el líquido). Por su parte las deformaciones de la orientación molecular conducen a las heterogeneidades del coeficiente de refracción de la luz.

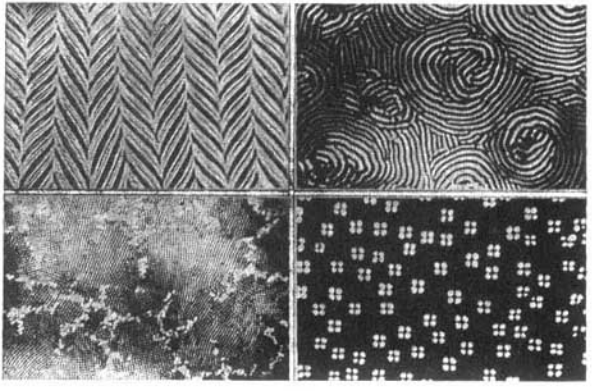


FIG. 65. *Ejemplos de distintos cuadros ópticos, cuya causa es la convección del cristal líquido en un campo eléctrico.*

Ante nosotros se plantea el problema: ¿qué ventaja nos dan algunas heterogeneidades pequeñas, invisibles para el ojo, en el índice de refracción? Pero ya hemos hablado sobre las singularidades del paso de la luz a través de los medios graneados. Realmente, el ojo puede no distinguir estos granos, pero cada uno ve la diferencia en las propiedades ópticas del agua y la leche o el hielo y la nieve. A través del agua o del hielo la luz pasa prácticamente sin pérdidas; a través de la leche o una capa de nieve el rayo recto no pasa, pero tampoco se absorbe en el interior. De hecho la luz se dispersa. Para la nieve el papel de granos lo desempeñan los microcristales de hielo, para la leche son las partículas de grasa suspendidas en el agua. En un caso y en el otro las dimensiones de los granos son conmensurables con las longitudes de ondas luminosas (partes de micrometros).

Pero resulta que la "leche" se puede hacer del cristal líquido, si se crean en él heterogeneidades ópticas, o sea, granos, sobre los cuales hemos hablado más arriba. En efecto, la capa del cristal líquido nemático, que era absolutamente transparente antes de conectarle la tensión, bajo la acción de la última se pone de color de leche, turbia por completo. Este fenómeno fue descubierto por primera vez por V. K. Frederiks y V. N. Tsvetkov en 1935. Después recibió el nombre de "dispersión dinámica de la luz" (ya comprende Ud. por qué se llama dinámica, pues se trata de un líquido en movimiento).

Al lector le puede parecer que para agitar el nemático, creando en él todo género de torbellinos, se necesita una corriente muy grande. En realidad, esto no es así. Para obtener una dispersión intensa en una capa fina, es suficiente dejar pasar a través del cristal líquido la corriente con una densidad de 1 $\mu A/cm^2$. Esta es suficiente para que los iones en movimiento cambien la orientación del eje óptico del nemático, ya que las fuerzas elásticas que se oponen a esto son pequeñas.

§ 4. EL MODELO DE LA NIEBLA Y LAS CORTINAS DIRIGIDAS

Continuaremos los "experimentos" con el cristal líquido. La dispersión dinámica de la luz es uno de los efectos más accesibles de observar, y para el experimento no necesitaremos ninguna instalación complicada. Lo más principal para

realizarlo es tener dos placas de vidrio (de tamaños, por ejemplo, de 30×20×2 mm³), cubiertas de un lado por una capa conductora transparente de bióxido de estaño u óxido de indio. Al haber un horno, donde la temperatura es de unos 400 °C, la capa de bióxido de estaño se aplica por sí misma, si al vidrio se acerca una tacita cerámica con cloruro estánnico (la tacita debe tener, sin duda, un mango largo de alambre). Las placas pueden cortarse de un vidrio de ventana habitual, pero sus bordes tienen que ser alisados por lo menos con papel de lija. Señalemos que V. K. Frederiks y V. N. Tsvetkov que descubrieron el efecto de la dispersión dinámica de la luz, utilizaban en calidad de electrodos las rejillas de alambre, ya que las propiedades notables de las capas de bióxido de estaño en los años 30 aún no se conocían.

Ahora hay que coger dos juntas estrechas, cortadas, por ejemplo, de un paquetito de polietileno y colocarlas entre los vidrios de modo que quede fijo un espacio definido entre los revestimientos conductores y, apretando todo el "bocadillo" con los dedos, pegarlo de los topes donde se encuentran las juntas, con lo que se quiera, incluso hasta con arcilla plástica (fig. 67). Controlaremos sin falta si los electrodos quedaron del lado interior de los vidrios.

Después es necesario llenar el espacio entre los vidrios con un cristal líquido. El PAA clásico, merced al cual fue descubierto el efecto, nos es incómodo, pues es nemático sólo en el intervalo de altas temperaturas desde 118° hasta 135 °C. Lo mejor de todo es coger esa sustancia tan difundida como MBBA sobre la que ya hemos hablado. MBBA es un cristal líquido a temperatura ambiente (pero en invierno es mejor tenerlo lejos de la ventana). Con ayuda del cuentagotas puede llenarse el espacio (véase la fig. 67), y las fuerzas capilares no dejarán que la sustancia salga fluyendo.

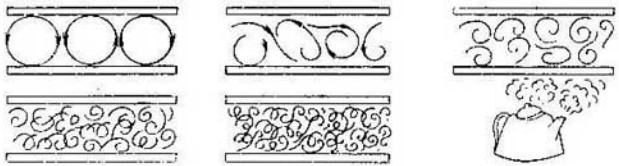


FIG. 66. *El desarrollo de la turbulencia en el nemático, conductor de la corriente eléctrica.*

Nos queda sólo coger dos o mejor tres pilas para la linterna de bolsillo, unirlas en serie y con ayuda de las pinzas conectarlas a los vidrios conductores (si se quiere y se tiene cierta práctica, los conductores pueden soldarse incluso al bióxido de estaño).

Examinando todo este "bocadillo" de vidrio a contra luz sobre el fondo, por ejemplo, de la ventana, Ud. verá claramente que al conectar la tensión, la capa adquiere un color de leche turbia y al desconectarla, se hace transparente. De este modo, tenemos un interruptor luminoso dirigido por el campo. Al mismo tiempo puede prestarse atención a la remanencia de este interruptor. Si las juntas de polietileno son relativamente gruesas (por ejemplo, de 50 µm), el tiempo de reacción del cristal líquido al campo y el tiempo de la reducción del efecto son segundos. Para los fines prácticos, por lo general se cogen juntas del orden de 10 µm, entonces los tiempos correspondientes son de décimas y hasta centésimas del segundo.

El experimento más efectivo con la dispersión dinámica de la luz está mostrado en la fig. 68. Aquí se utiliza la misma construcción de vidrio como anteriormente. La iluminación se lleva a cabo mediante el rayo láser a mezcla de helio y neón portátil y detrás del interruptor de cristal líquido se instala una pantalla blanca.

En ausencia del campo eléctrico la luz del láser pasa a través del cristal líquido y nos da un punto rojo brillante en la pantalla. Al conectar el campo eléctrico, la luz se dispersa muy efectivamente por el cristal líquido en todas las

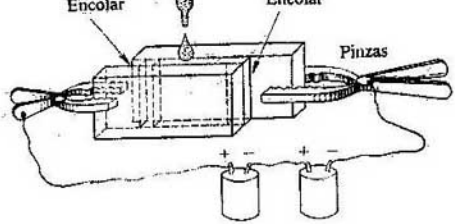


FIG. 67. *Experimento con el cristal líquido.*

direcciones. La luz dispersa puede hacerse visible fácilmente con ayuda del humo del cigarrillo, cuya utilidad en este caso no provoca duda alguna. En la pantalla puede verse una mancha circular grande de luz. Es agradable señalar que para observar el efecto de dispersión, no se necesita utilizar polarizador, ni tampoco analizador. Entonces, faltan las pérdidas de la luz en la absorción, y estando desconectado el interruptor, no baja el brillo de la fuente luminosa.

Surge la pregunta ¿es posible en lugar de vidrios pequeños que hemos utilizado, coger los cristales grandes de las ventanas? Resulta que se puede. Es verdad, que ellos van a encorvarse, pero para evitarlo, podemos en vez de juntas estrechas, colocar entre los cristales una red fina de caprón. Cuando la rendjia entre los cristales se llene por el cristal líquido, la red prácticamente no se verá.

De resultas puede hacerse algo parecido a las cortinas dirigidas, si por ejemplo surge la necesidad de esconder algo del ojo curioso. Esto tendría un aspecto como está mostrado en la fig. 69. Con ayuda del mismo efecto puede hacerse también un interruptor luminoso que debilite el haz de la luz de láser en 10 000 veces, si se utiliza un sistema óptico, cuya pupila es muy pequeña y registra sólo el haz luminoso de entrada directo y no capta los rayos dispersos.

El efecto de la dispersión dinámica de la luz nos permite imitar la niebla o hacer modelos de distintos medios dispersores. Esto es importante para el estudio de la física de dichos medios. Las instalaciones que imiten la niebla fuera del avión, pueden utilizarse durante la instrucción de los pilotos en condiciones reales del vuelo.

En la técnica de indicadores el efecto de la dispersión dinámica de la luz se aplica a gran escala. Si en los relojes

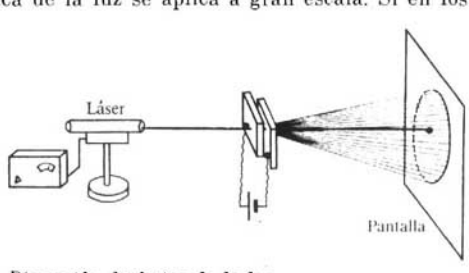
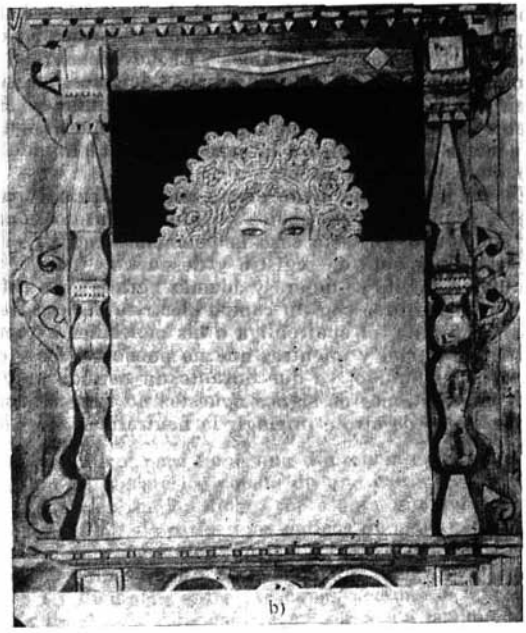


FIG. 68. *Dispersión dinámica de la luz.*

FIG. 69. *La cortina dirigida tendría este aspecto (este cuadro es obra del pintor ruso I. Glazunov "La bella rusa"):*
a) no hay dispersión dinámica;

electrónicos y calculadoras con empleo de los cristales líquidos, los indicadores basados sobre este efecto no eran muy rentables en instalaciones más complicadas de indicadores, donde además se exige un brillo más elevado de la imagen, este efecto resultó bastante conveniente. Por ejemplo, los indicadores basados en la dispersión dinámica se utilizan en los tableros de aparatos de los automóviles. En el automóvil el acumulador es bastante potente y el consumo elevado de la energía por el indicador en este caso no es esencial. Mientras que la ventaja en el brillo y la posibilidad de observar las imágenes bajo ángulos bastante grandes, caracte-



Continuación de la fig. 69.
b) efecto de la dispersión dinámica.

rísticos para la dispersión dinámica, son muy atractivos.

Existe una variedad interesante del efecto de la dispersión dinámica que permite conservar por mucho tiempo (por ejemplo, meses) un estado de color de leche turbia incluso después de desconectar la tensión. En este caso se realiza la memoria óptica. Este fenómeno se observa, excitando mediante el campo no un nemático ordinario, sino su mezcla con los cristales líquidos que tienen una estructura espiral. Los conoceremos en el capítulo siguiente. Estando el campo conectado, igual que en un nemático habitual, surge el movimiento del líquido. Al desconectar el campo, este movimiento, sin duda, cesa (éste no puede continuar en ausencia de energía de afuera, ya que ella se gasta en el roza-

miento interior). Pero a diferencia de los nemáticos habituales, para estas mezclas es característica la formación de defectos de orientación "no curables". El movimiento del líquido contribuye a la formación de dichos defectos que se conservan también después de terminar el movimiento. En los defectos de orientación tiene lugar la fuerte dispersión de la luz, además en este caso a la capa del cristal líquido no se le conduce energía de afuera.

Esto significa que dicho efecto puede utilizarse para los tableros grandes, en los cuales la información no se cambia muy a menudo. En este caso la potencia eléctrica se gasta sólo en el momento de registro y después la imagen puede examinarse cuanto se quiera y además "gratis". La información puede borrarse con un campo eléctrico de una frecuencia bastante alta, el cual obliga a las moléculas a tomar su orientación inicial y mientras que no puede provocar el movimiento del líquido, ya que durante un período muy corto del campo los iones de signos opuestos no tienen tiempo de separarse uno de otro e infringir la neutralidad eléctrica del medio.

Capítulo IV
MOLÉCULAS ESPIRALES

Seguramente, los primeros cristales líquidos que cayeron en manos del investigador, fueron los éteres de la colesterina. Su comportamiento al variar la temperatura no se parecía a nada de lo conocido, bueno, mejor dicho tenía algo similar a la conducta del camaleón: cambiaban pronto su color. Mucho más tarde se aclaró que ellos también eran cristales líquidos, pero aún más insólitos. Semejantes líquidos se denominan hoy en día líquidos de colesterina o, en abreviatura, colestéricos.

Por su estructura, el colestérico nos recuerda en gran parte al nemático, pero tiene una diferencia esencial. Puede decirse que el colestérico consta de una cantidad grande de capas nemáticas, mejor dicho, representa una pila de tales capas (fig. 70) *). Pero los ejes ópticos de estas capas tienen un giro en cierto ángulo, con la particularidad de que para dos capas vecinas dicho ángulo es una magnitud pequeña $\alpha \approx 0{,}5^\circ$. La distancia entre las capas vecinas es aproximadamente igual a la dimensión transversal de la molécula a. Si uno se mueve a lo largo del eje z, perpendicular a los planos de las capas, al cabo de un número de capas de $180^\circ/\alpha$, su orientación se hace la misma que en la primera capa. La distancia $h = (360^\circ/\alpha)\ a$ dentro de la cual las moléculas se dan la vuelta en el espacio en 360°, es el doble período de una red peculiar. La magnitud h se denomina paso de la espiral que forman en el espacio los extremos de las moléculas que yacen en las capas sucesivas (fig. 70).

La red periódica del colestérico, o en otras palabras, la espiral colestérica sorprende con que la estricta alternación en ella se refiere sólo a la orientación de las moléculas. Al mismo tiempo en cada capa nemática las moléculas pueden

*) Recordamos que las moléculas dentro de las capas nemáticas se desplazan libremente. Sin embargo, son muy raros los saltos de las moléculas de capa en capa.

desplazarse libremente y cambiar de sitio. En una palabra, el líquido colestérico fluye libremente a lo largo de semejantes planos, sin destruir casi la espiral. Las moléculas pueden también saltar de capa en capa, dando la vuelta en un ángulo α. Pero ello no se les da tan fácil. Por eso las propiedades de la red con un período de $h/2$ a lo largo del eje z ya tienen una semejanza determinada con las del cristal sólido.

Las peculiaridades de la estructura de los colestéricos se manifiestan con más intensidad al variar la temperatura de la sustancia y bajo las diversas influencias exteriores. La espiral colestérica demuestra toda la paleta de colores sensibles a los más pequeños deterioros de esta red peculiar. Todo esto explica el permanente interés en estudiar y emplear los cristales líquidos colestéricos. ¿Cuál es la causa de esta estructura tan rara del colestérico? La explicación consiste en una pequeña singularidad que poseen sus moléculas.

§ 1. MOLÉCULAS IZQUIERDAS Y DERECHAS

Las moléculas pueden ser especularmente simétricas y asimétricas. Por ejemplo, las moléculas del nemático son especularmente simétricas. En efecto, si colocamos ante el espejo unas moléculas dibujadas en la fig. 9, nos convenceremos de que sus imágenes especulares no se diferencian en nada de ellas mismas. Ahora miren la fig. 71. Aquí, como ejemplo están representados los habitantes del mar y sus reflejos en los espejos, situados mentalmente por la perpendicular en el medio de los cuadros. Los delfines derecho e izquierdo, las mitades derecha e izquierda del pulpo no coinciden entre sí. Lo mismo nos pasará si queremos hacer

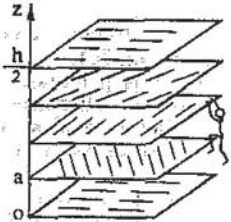


FIG. 70. *El colestérico puede representarse como una pila de capas nemáticas finas.*

coincidir la mano derecha y la izquierda, cada una de las cuales es el reflejo especular de la otra. Todo lo mencionado son ejemplos de la asimetría especular.

No será una exageración si decimos que durante milenios a la gente ya le interesaba el problema de la simetría de diversos objetos con respecto a su imagen en el espejo. Los dibujos citados de los delfines y del pulpo adornaban el suelo del palacio real (1200 años antes de nuestra era) en la famosa ciudad de Tirinto (Grecia). La simetría especular se relacionaba con la armonía y tranquilidad y la ausencia de la mencionada simetría, con el movimiento y relajamiento. Los templos griegos y las catedrales cristianas poseen, por regla general, una simetría especular, ya que según la intención de sus creadores, ellos debían ser símbolos de la firmeza de los dogmas religiosos *). Es verdad que también existen excepciones en estos casos. Échese una mirada a la cúpula jovial de la iglesia de Basilio el Bienhechor en la plaza Roja de Moscú (fig. 72). Mientras que los delfines juguetones y el revoltoso pulpo (fig. 71) están en un contraste evidente con el carácter estático de la simetría especular.

La existencia del espejo, de la superficie plana especular de los estanques y lagos permiten establecer bien la presencia, bien la ausencia de la simetría y ver la diferencia entre lo derecho e izquierdo. Pero qué objeto puede denominarse precisamente derecho o izquierdo se escoge al azar. Nosotros hacemos esta elección, guiándonos por la regla del tornillo, más concretamente, por la regla del giro alrededor de su eje. Recordemos los tornillos izquierdo y derecho en las oscilaciones electromagnéticas (fig. 13): allí hemos prefijado la orientación del eje del tornillo y los giros alrededor de éste dextrógira (a la derecha) y levógira (a la

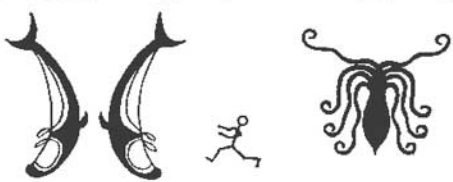


FIG. 71. *Reflejo especular.*

*) H. Weyl. Symmetry. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1952.

izquierda). Hacemos la elección entre la mano izquierda y la derecha, sobreentendiendo implícitamente que existe el eje del tornillo, dirigido desde los pies hacia la cabeza de nuestro cuerpo. Si cambiásemos la dirección del eje por la contraria, tendríamos que hacer un intercambio entre las denominaciones "izquierda" y "derecha".

La imagen especular del tornillo derecho es el izquierdo y viceversa (fig. 73). El original y la imagen no coinciden, sin duda alguna, aunque en el ejemplo citado los ejes de los tornillos tienen la misma orientación: sólo se diferencian las direcciones de los giros. Precisamente con esta circunstancia están relacionadas las aventuras divertidas de Alicia en el libro de Carroll Lewis "A través del espejo". La niña cae en un mundo situado tras el espejo, en el que todos los tornillos derechos deben sustituirse por los de izquierda y viceversa, de lo que Alicia no se da cuenta. Pero el eje perpendicular de la colina a la que ella quiere subirse, tiene la misma dirección en ambos mundos. Por su anterior experiencia, Alicia sabe que para subir la colina tiene que ir por el camino a la izquierda. Eso es precisamente el tornillo izquierdo o la espiral izquierda. En el mundo tras el espejo este tornillo se convirtió en el derecho, pero Alicia aún no sabe eso. Entonces, ¿qué es lo que sucede?

"... He aquí el caminito, me conducirá directamente hacia allá... No, no me lleva hacia allá, pero, posiblemente que, al fin y al cabo, me conduzca hacia allá, —se decía ella para sus adentros, yendo por el caminito y sorprendiéndose de los virajes inesperados—. Qué manera más curiosa de torcerse. No es un caminito, sino un sacacorchos. Veamos, esta vuelta sí que es hacia la colina. ¡Ay, no! Esta lleva

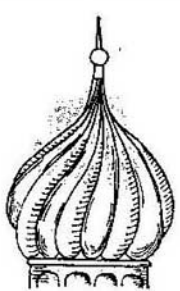


FIG. 72. *Cúpula "derecha" de la iglesia de Basilio el Bienhechor.*

directamente a casa. Bueno, buscaremos otro camino" *.

Después de varios intentos desafortunados de alejarse de casa hacia la colina, Alicia decide ir por el camino en sentido contrario, o sea, por la espiral derecha. Y en este caso, naturalmente, todo le sale bien.

En la naturaleza se encuentran con frecuencia cristales sólidos que no poseen simetría especular, es decir, existen bien en la forma derecha, bien en la izquierda. Cada una de estas formas es el reflejo especular de la otra. Es difícil suponer que la naturaleza hubiese preferido una forma del cristal a la otra. Con más frecuencia ambas formas son en término medio, equiprobables. Es verdad que existen excepciones. Por ejemplo, en el organismo humano existen sólo la forma derecha de glucosa y la forma izquierda de fructosa. El consumir en la alimentación sustancias de forma contraria provoca enfermedades muy graves. Es posible que la causa de la ausencia del equilibrio entre las formas derecha e izquierda de la sustancia está en que cierta acción de afuera perturbó el equilibrio frágil que existía en el origen de la vida. Se sabe que las radiaciones neutrónica, ultravioleta y otras pueden cambiar la estructura de las moléculas. Pero los problemas del funcionamiento de las células biológicas y las cuestiones del origen de la vida son muy complicados y aún esperan su completa resolución. Trata-

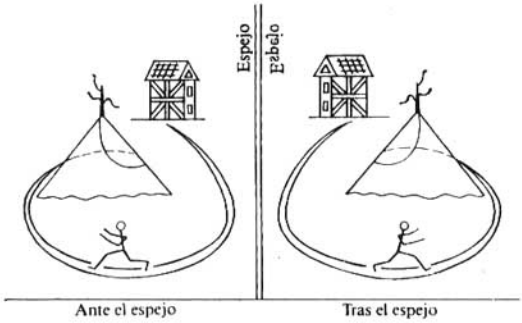


FIG. 73. *En el mundo tras el espejo todo es al revés.*

*) L. Caroll "Alicia en el país de las maravillas", "A través del espejo", cap. II. Alianza Editorial. Madrid.

remos estas cuestiones con más detalle en final del libro cuando haremos una digresión a la biología.

Los químicos aprendieron a obtener moléculas derechas e izquierdas en cantidades necesarias para la ciencia y la práctica. En lo sucesivo hablaremos de su arte. Ahora intentemos representar una molécula que no es especularmente simétrica. Ella debe parecerse bien a la mitad derecha, bien a la izquierda de la fig. 73, es decir, debe haber una superficie más o menos plana y en ella una colina o un saliente, por el cual, como serpentina, sube el sendero. En nuestro caso al sendero lo sustituye una cadena de átomos que va del sector plano principal de la molécula (del pie de la colina), torciéndose en una espiral derecha o izquierda (fig. 74). En realidad en la cima de la colina o del saliente se encuentra cualquier átomo, el más alejado del plano principal de la molécula, mientras que la cadena espiral puede ser muy corta: simplemente un segmento de la espiral.

Esa es la estructura de las moléculas con un tornillo derecho o izquierdo. Los colestéricos constan precisamente de dichas moléculas. La semejanza de las moléculas del colestérico y del nemático consiste en que ambas tienen grandes sectores planos, estirados intensamente en una dirección. La molécula del colestérico posee además de ese sector, un trocito de la espiral. El grosor de la molécula a es de cerca de un nm y su longitud general l, de varios nanometros. El plano principal cuenta con varias decenas e incluso centenas de átomos, mientras que el saliente espiral cuenta con unidades de átomos. He aquí la causa del por qué el coles-

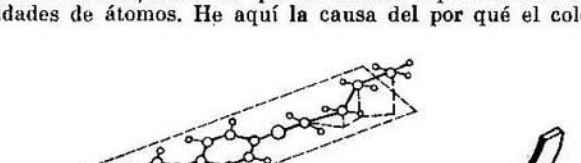


FIG. 74. *El sector plano principal y un segmento espiral de la molécula:*

a) estructura atómica; b) simulación con un segmento de espiral.

térico, conservando ciertos rasgos del nemático, al mismo tiempo no se parece a él. Para apreciar en su justo valor el trabajo fino y complicado de los científicos, poseedores de las llaves de la puerta al mundo tras el espejo, examinemos ciertos ejemplos de la estructura de moléculas reales.

§ 2. SOBRE LA MAESTRÍA DEL QUÍMICO

Se supone que todos saben cómo trabajan los físicos. La física es una ciencia que está de moda, sobre los físicos se han escrito muchos libros y se han filmado bastante películas. Mientras que a los químicos se les enseña mucho menos en las películas. Pero en vano, ellos son precisamente reales Creadores con letra mayúscula, ya que el químico crea nuevas moléculas, los verdaderos ladrillos del Universo.

Aquí nos planteamos una tarea muy modesta. El relato sobre los cristales líquidos sería incompleto, incluso puede decirse, truncado, si no citásemos ejemplos de obtención de sustancias de cristales líquidos y no examinásemos por lo menos unas cuantas fórmulas estructurales químicas. En general, muchos consideran estas fórmulas como un ornamento aburrido. Antes de encontrar la clave de la escritura cuneiforme sumeria también era aburrido examinar unas piedras agrietadas, en las cuales, como se aclaró posteriormente, estaba encerrada la sabiduría eterna de la humanidad. El que sintió la lógica de la construcción de las fórmulas químicas, ve muy bien la divina arquitectura de las moléculas, acondicionada por las reglas enigmáticas del juego mutuo de los átomos. Al parecer, la mecánica cuántica hace tiempo ya explicó la estructura de los átomos y describió todas las posibles interacciones de ellos. No obstante, es imposible predecir teóricamente la estructura de una molécula compleja, y al crear nuevas moléculas, el químico no puede trabajar sin intuición.

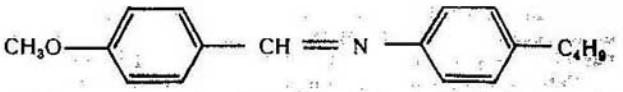
Claro está que se trata de la química orgánica, ya que todas las sustancias de cristal líquido conocidas hoy en día, constan de moléculas orgánicas, es decir, representan en sí compuestos de carbono con hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y otros elementos. Entre los compuestos inorgánicos no se ha encontrado por ahora ningún cristal líquido, aunque, en principio, eso no se excluye. Las moléculas de los cristales líquidos típicos son bastante complejas. Por ejemplo, en la

molécula de MBBA, relativamente sencilla, hay 18 átomos de carbono, 21 átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno y de nitrógeno, o sea, en total 41 átomos, de que se puede fácilmente cerciorarse, contando los átomos mediante la figura 47. Por desgracia, los cristales líquidos no se encuentran con tanta frecuencia en la naturaleza (por regla general, sólo en objetos biológicos, véase el cap. VI). Por ello es necesario confeccionarlos, o como se dice, sintetizarlos de modo artificial. A diferencia del análisis que significa un camino de lo complejo a lo simple, la síntesis supone el camino de lo simple a lo complejo.

La síntesis química es la creación de una estructura molecular singular y compleja utilizando conocidas partes más simples. Las moléculas se reúnen de una manera parecida, aproximadamente, a como reúnen los modelos de un constructor infantil, aunque muchas veces el químico tiene que chocar con semiproductos no tan sencillos (incluyendo los venenos y explosivos) y sintetizar a altas temperaturas o, al contrario, a bajas, en un vacío o a presiones altas.

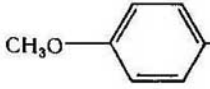
Incluso, una vez obtenido el compuesto necesario, es temprano descansar. Sólo se cumplió media tarea. Primero, es necesario convencerse de si la sustancia obtenida es precisamente la que queríamos tener. Para ello se tendrá que hacer varios análisis, efectuar cierta "comisión médica" con la participación de los más diversos especialistas. Aquí están presentes el análisis químico de elementos, la espectroscopia, las investigaciones físico-químicas, etc. Segundo, si se trata de cristales líquidos, resulta muy importante una minuciosa purificación de la sustancia de las impurezas ajenas, sobre todo de los iones. En caso contrario, la conductibilidad eléctrica de la sustancia será muy elevada, y al aplicarle la tensión, irán a través de la sustancia corrientes muy grandes. A su vez esto reducirá el plazo de servicio del dispositivo y aumentará la potencia consumida. Hoy día está elaborada una serie de ingeniosos métodos físicos y químicos de purificación que permiten obtener unas concentraciones muy bajas de los iones ajenos —impurezas (hasta un ion para mil millones de moléculas de la sustancia principal e incluso menos).

Pero volvamos a la síntesis. Examinemos una vez más la estructura molecular de MBBA (fig. 47, *a*) y representemos la fórmula estructural química de este compuesto, como se admite en la literatura química:



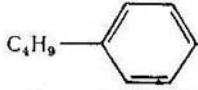
Se ve que esta fórmula contiene en sí toda la hermosura del modelo molecular, mostrado en la fig. 47, si nos ponemos de acuerdo con que en la fórmula química los hexágonos han sustituido los anillos bencénicos (junto con los átomos de hidrógeno que entran en la composición de los anillos). Así, pues, dicha molécula contiene sólo átomos de carbono, hidógeno, oxígeno y nitrógeno. Pero sería incorrecto pensar que, al meditar la síntesis de MBBA, el químico coge un puñado de carbono puro en forma de grafito o, digamos, diamantes, trae al laboratorio tres balones con hidrógeno, nitrógeno y oxígeno y se pone a trabajar. Unos trescientos años atrás, cuando aún no existía la química orgánica, se podría intentar hacer eso. Ahora a los químicos les es más fácil. La industria química desarrollada les proporciona un enorme surtido de "materiales de construcción" en forma de moléculas-semiproductos bastante complejas.

Es muy significativo el caso con MBBA. El cristal líquido se obtiene sólo en una etapa. Es suficiente coger en proporción necesaria dos líquidos que se producen industrialmente. El primero de ellos (aldehído anísico)



(1)

en lo sucesivo nos da la parte izquierda de la molécula MBBA, y el segundo (butilanilina)



(2)

se convertirá en la parte derecha. Con fin de realizar la reacción, ambos líquidos se disuelven en alcohol, mezclan las dos soluciones y luego, calentando, evaporan el solvente. Durante la reacción, del átomo de carbono del grupo

en la molécula (1) se desprende el oxígeno, y los electrones que quedan forman un enlace doble con el áto-

mo de nitrógeno de la molécula (2), que pierde dos átomos de hidrógeno. Se obtiene MBBA y agua. Es necesario eliminar el agua y ya tenemos preparado el cristal líquido.

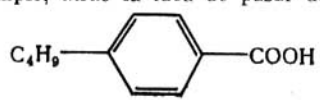
Pero está lejos de ser siempre tan simple la síntesis orgánica. A veces se requiere el virtuosismo de un ilusionista. El rey de la síntesis, el químico norteamericano Woodward, obtuvo, por ejemplo, la vitamina B_{12} mediante 60 etapas. Pero, claro está, que las vías sin salida de la síntesis no se cuentan. Con seguridad, por dicha síntesis que transcurrió 20 años, Woodward hubiese recibido el Premio Nobel, de no haberlo obtenido ya antes por la síntesis de la molécula de clorofila (merced a la cual toda la verdura es verde) y una serie de otras moléculas. Estas moléculas eran tan complejas que Woodward las dibujó en el encerado con las dos manos a la vez, a la derecha y a la izquierda, para economizar el tiempo.

Al sintetizar los cristales líquidos, cuyas moléculas son evidentemente más sencillas que las de la vitamina B_{12} (a causa de la indispensable forma de bastoncito), con frecuencia hace falta realizar hasta 15—20 etapas químicas intermedias, sin contar la purificación y los posteriores análisis.

Sin embargo, las dificultades de la síntesis pueden acondicionarse no sólo por un número grande de reacciones intermedias. En el párrafo anterior ya hablamos de las formas izquierda y derecha de las moléculas que poseen diversas propiedades ópticas, es decir, son antípodas ópticas. Las moléculas que no se diferencian por su composición, pero que tienen diversa estructura espacial, se denominan isómeros. Los isómeros ópticos derechos e izquierdos son sólo un ejemplo. Volveremos a continuación a él, mientras tanto examinaremos otro tipo de isomería.

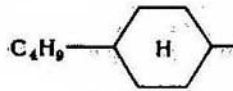
La experiencia del trabajo con los cristales líquidos muestra que la sustitución del anillo bencénico, en el cual los enlaces químicos dobles y unitarios se alternan, con el del ciclohexano que contiene sólo enlaces unitarios, conduce a una disminución notoria de la viscosidad de la sustancia y al mejoramiento de la velocidad con la que funcionan los dispositivos correspondientes.

Por ejemplo, atrae la idea de pasar del ácido benzoico



(3)

que contiene el anillo bencénico, al respectivo ácido a base del ciclohexano



(4)

Esto se puede hacer de la siguiente manera. Es necesario añadir un átomo de hidrógeno a cada uno de los ángulos del anillo y todos esos átomos se cogerán para sí los enlaces sobrantes (fig. 75, *a, b*).

Este proceso de adición de hidrógeno o, como se dice, de hidrogenación del anillo bencénico, los químicos lo realizan ubicando el compuesto inicial en autoclave, donde la presión del hidrógeno alcanza 150 atmósferas a temperatura de 150 °C (en este caso se emplea también un catalizador). Pero no todo resulta tan simple. Es que, a diferencia del anillo bencénico (fig. 76, *a*), el del ciclohexano no es plano. Existe bien en forma de "sillón" o bien en forma de "baño" (fig. 76, *b, c*). Esto es un ejemplo más de la isomería de las moléculas. La geometría del "baño" es totalmente incompatible con la estructura de bastoncitos, necesa-

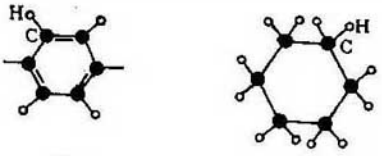


FIG. 75. *El anillo de ciclohexano (b) a diferencia del bencénico (a) no tiene enlaces químicos dobles.*

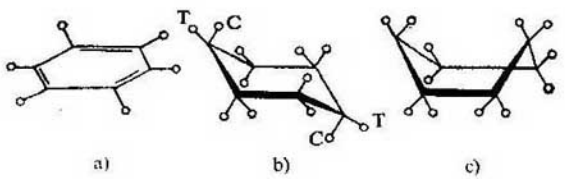


FIG. 76. *La forma espacial del anillo bencénico (a) se distingue de modo esencial de la estructura de los isómeros del anillo de ciclohexano en forma de "sillón" (b) y "baño" (c).*

ria para obtener un estado de cristal líquido, mientras que los "sillones", al contrario, son los apropiados. En este caso las moléculas forman pares, como ilustra la fig. 77. Afortunadamente, en ausencia del calentamiento, hay poca sustancia en forma de "baños", ya que casi toda la sustancia consta de "sillones".

Pero tampoco eso es todo. Examinemos una vez más los "sillones" (fig. 76, *b*). Resulta que hay dos posibilidades de añadir los sustituyentes en las posiciones extremales izquierda y derecha. Estas variantes se indican mediante la letra T (isómero trans) y C (isómero cis). La molécula del cristal líquido debe tener una forma lo más posible estirada, para ello son válidos sólo los isómeros trans (fig. 77). Por lo tanto nuestra tarea consiste en separar los isómeros trans que necesitamos, de los isómeros cis que nos estorban.

Desde el punto de vista energético, a la molécula le es más ventajoso estar en la forma trans que en la cis. En este caso la energía total de la interacción de los átomos de hidrógeno con los átomos de carbono en el anillo se reduce (fig. 78). Sin embargo, a causa del carácter específico de la acción del catalizador, durante la reacción química los isómeros cis se forman con mayor facilidad, por lo que en la mezcla obtenida la relación de los isómeros trans y cis es de 1 : 1. Claro está que con el tiempo todos los isómeros cis deberán transformarse en la forma trans, pero a temperatura ambiente tendríamos que esperarlo en el transcurso de varios años. Es que a temperaturas circundantes son poco frecuentes los choques térmicos de suficiente fuerza, capaces

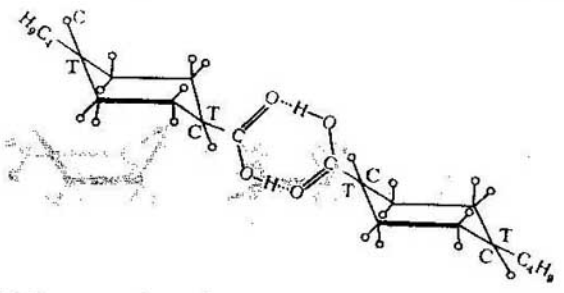


FIG. 77. *Sólo tales pares que se encuentran en una forma completa trans con anillos de aspecto "sillones", constituyen el cristal líquido.*

de obligar a las moléculas cis a saltar la barrera energética (fig. 78) y pasar a la forma trans. Pero si calentamos la mezcla hasta 300 °C, al cabo de unas horas la mayoría de las moléculas cis saltarán la barrera y adquirirán la forma trans. Al enfriar la mezcla hasta la temperatura ambiente, obtendremos la relación de los isómeros de 4 : 1. Esto ya es suficiente para formar un nemático, así que la tarea de la síntesis del cristal líquido puede considerarse cumplida.

Queda por examinar sólo las peculiaridades de la síntesis de las moléculas especularmente asimétricas, que se necesitan para obtener cristales líquidos con estructura espiral. La principal dificultad consiste en que durante las reacciones químicas corrientes las moléculas-semiproductos derechas siempre dan sólo los productos resultantes derechos y viceversa, las sustancias izquierdas sólo se obtienen de compuestos iniciales izquierdos. Pero, por regla general, los compuestos iniciales tienen cantidades iguales de isómeros izquierdos y derechos. Por ello con fin de obtener sólo formas derechas o sólo formas izquierdas pueden usarse tres procedimientos. El primero consiste en que la síntesis comienza de un isómero determinado (por ejemplo, del derecho), separándolo del izquierdo. De qué manera puede hacerse eso, lo contaremos un poco más abajo. También puede emplearse uno de los isómeros en calidad de un reactivo intermedio.

El segundo procedimiento prevé el empleo de un disolvente especial sin simetría especular. Por ejemplo, si sintetizamos, empleando en calidad del compuesto inicial una mezcla de ambos isómeros en cantidades iguales y tomando a título de disolvente el cristal líquido colestérico derecho, en el compuesto obtenido predominarán los isómeros derechos. Es verdad que hay que decirlo honradamente, que este procedimiento no es muy eficaz; la cantidad de isómeros derechos e izquierdos en el producto resultante no se diferencia en mucho.

El tercer camino consiste en elegir sólo las moléculas

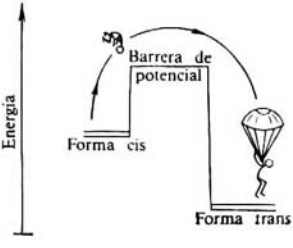
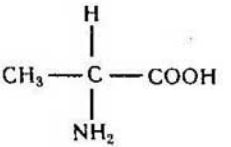


FIG. 78. *Bajo la acción de un choque térmico, la molécula puede saltar la barrera de potencial y pasar de la forma cis a la trans.*

derechas del producto resultante. Esto se puede hacer, por ejemplo, de la manera siguiente. Es preciso intentar que de una solución con moléculas izquierdas y derechas, crezcan cristales de dimensiones máximas. Resulta que las moléculas izquierdas forman sus cristales y las derechas, los suyos, con la particularidad de que la forma geométrica de los cristales izquierdos y derechos se diferencia. Ahora pueden cogerse unas pinzas y ponerse los cristales izquierdos a una parte (¡no es obligatorio ponerlos a la izquierda!) y los derechos, a la otra. Se puede distinguir los cristales derechos de los izquierdos también mediante un procedimiento óptico, observando a qué parte el cristal hace girar el vector de las oscilaciones eléctricas del rayo luminoso. Además, se les puede disolver por separado y medir la rotación del vector de la polarización de la luz en la solución. Así, precisamente actuó cien años atrás el famoso Pasteur que fundó la microbiología y además, fue el primero que propuso este método. Dicho método da buenos resultados sólo cuando se logra que crezcan grandes cristales.

La síntesis de las moléculas complejas que no poseen simetría especular se lleva a cabo más a menudo, partiendo de las simples moléculas-semiproductos derechas e izquierdas. Por ejemplo, puede usarse el isómero izquierdo del aminoácido



obtenido mediante el método bioquímico. En este método (a propósito, también lo propuso Pasteur) se utilizan los microorganismos (digamos, los hongos de levadura) que simplemente "comen", por ejemplo, el isómero derecho del aminoácido, menospreciando absolutamente el izquierdo, dejándolo a los químicos para el ulterior trabajo. De hecho, aquí se aprovecha la casualidad que ya hemos mencionado antes, en la evolución de los objetos biológicos, merced a la cual ciertas formas (derechas o izquierdas) resultaron por algo preferentes.

Tomando como compuesto inicial el aminoácido izquierdo y realizando una serie entera de reacciones sucesivas ya con

los compuestos ordinarios (especularmente simétricos), los químicos obtienen un isómero izquierdo del cristal líquido. Mediante dicho procedimiento (a veces durante 10 ... 20 etapas) con la forma derecha del aminoácido obtenemos el cristal líquido derecho. Aplicando los cristales líquidos en cuestión, podemos realizar, como ya se ha dicho, la síntesis asimétrica de los compuestos izquierdos o derechos, partiendo de las moléculas simétricas.

Merced al arte de los químicos los cristales líquidos para hoy día ya no son un exotismo; se han sintetizado más de seis mil compuestos de cristal líquido que poseen las más diversas propiedades.

§ 3. LA ESTRUCTURA TWIST Y EL PASO DE LA ESPIRAL

¿Qué es lo nuevo que introduce la forma espiral de las moléculas a la orientación del eje óptico del cristal líquido? Ante todo, examinando la forma estirada de las moléculas, es razonable suponer que se les puede disponer paralelamente una a otra, por lo menos en una capa fina (fig. 79). Entonces, existe la posibilidad de ajustar cómodamente una molécula a la otra, lo que corresponde (como ya sabemos) al balance de las fuerzas que actúan entre ellas. Así, pues, la capa separada de moléculas tiene un eje óptico **L**. Pero aquí es preciso hacer una restricción: no es obligatorio que todas las moléculas tengan en semejante capa nemática, a la vez, la misma orientación de todas las partes de las moléculas. Por ejemplo, las moléculas pueden girar alrededor de sus ejes longitudinales, de modo que en diferentes lugares las secciones principales (planas) de las moléculas se encuentran bien de plano o de canto a la capa. Esto tiene lugar en un nemático real. Por eso la figura se necesita sólo como modelo.

Luego queremos adjuntarle a esa capa primera otra capa nemática de moléculas con su eje óptico **L**. Claro está que en este caso también tiene que obrar el principio del equilibrio de

FIG. 79. *Disposición de las moléculas espirales en una capa nemática fina.*

las fuerzas. En cambio, no están prohibidos los giros de las moléculas alrededor de sus ejes longitudinales. Semejantes giros se denominan, por ejemplo, choques térmicos. Las moléculas de la capa *2* pueden ser paralelas a las moléculas de la capa *1* (se trata de las secciones principales —planas— de las moléculas), si las capas se encuentran la una de la otra a una distancia igual, aproximadamente, a la suma del grosor de la sección principal de la molécula *a* y la altura del saliente espiral *b*. En este caso los salientes no estorban a las moléculas girar alrededor de sus ejes, pero las fuerzas de atracción de las secciones planas hacen que las moléculas se acerquen. Lo dicho está relacionado con que la distancia entre ambas capas aumenta de hecho en la altura del saliente *b* (fig. 80, *a*).

Pero existe otra posibilidad de la orientación mutua de los ejes ópticos L_1 y L_2. Si la distancia entre las capas finas es inferior que en el caso mostrado en la fig. 80, *a*, los vectores L_1 y L_2 no pueden ser estrictamente paralelos. Esto se origina a causa de que ahora las moléculas no podrían girar libremente alrededor de los ejes longitudinales; estorbarían los salientes. Pero sabemos que los choques térmicos impiden a las moléculas retener en una misma posición todos los elementos de su estructura. Sólo la orientación de los ejes longitudinales permanece invariable, ya que a lo largo de éstos se sitúa la masa principal de los átomos. De esta manera, llegamos a la conclusión de que los vectores L_1 y L_2 deben componer entre sí un ángulo pequeño α (fig. 80, *b*). Entonces se logra el equilibrio de las fuerzas, puesto

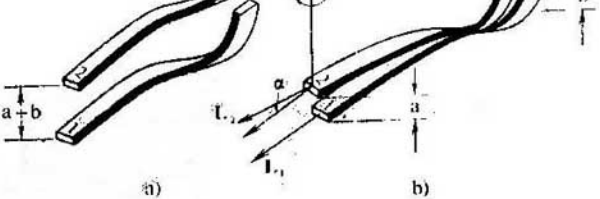


FIG. 80. *Disposición de las moléculas espirales en las capas nemáticas vecinas:*

a) no ventajosa desde el punto de vista energético; *b*) energéticamente ventajosa.

que las secciones planas de las moléculas se encuentran más cerca, y al mismo tiempo las moléculas obtienen una libertad determinada para los giros alrededor de sus ejes largos.

Estos razonamientos, a pesar de ser aproximados, dan cierta comprensión de cómo las moléculas con salientes podrían situarse en las capas vecinas y, por lo tanto, también en las pilas de capas. En este caso importa qué tornillo forman las moléculas del colestérico, el derecho o el izquierdo. Las figuras 74, 79 y 80 ilustran las moléculas izquierdas. Conforme a lo dicho, pasando de una capa a la otra por una perpendicular que coincide con los ejes de los tornillos, los ejes ópticos giran de modo levógiro. Entonces las secciones de las moléculas tanto espirales, como planas, *1* y *2* pueden acercarse a una distancia la mínima posible, con la cual existe el balance de fuerzas. Por lo tanto las moléculas izquierdas forman en la pila de las capas una espiral izquierda de ejes ópticos (fig. 70).

Las moléculas derechas forman en el espacio, del mismo modo, una espiral derecha del colestérico. Semejante espiral se denomina orientación twist, ya que en inglés la palabra twist significa torsión. Dio el nombre a una entera dirección en el arte de baile. La orientación de las moléculas del colestérico como si se congelase, con la particularidad de que eso resulta por no coincidir con su reflejo especular.

Una circunstancia notable es que la estructura laminar (de capas) del colestérico con una u otra espiral de los ejes ópticos surge en la sustancia por sí misma, sin cualesquiera causas ajenas. Para que se forme el tornillo no hacen falta ningunas influencias, ni defectos. Por esta característica el colestérico se diferencia de muchos cristales sólidos, en los cuales la estructura peculiar de capas y el tornillo observado se relacionan frecuentemente con la existencia de defectos de la red cristalina. Aclaremos lo dicho en el ejemplo del crecimiento de ciertos cristales sólidos (fig. 81). Como regla, el cristal crece directamente de la solución líquida de la sustancia. Primero aparece un plano cristalino, en él se precipitan de la solución los átomos libres que forman el segundo plano cristalino, etc. Pero a menudo resulta que ya el primer plano tiene un defecto (fig. 81, *a*). Este tiene el aspecto como si un disco plano fuese cortado por el radio hasta el centro y los puntos extremales del corte fuesen separados según la perpendicular. Dicha separación es igual a la distancia entre los átomos vecinos en la red cristalina. Luego los extremos se "cosen" de nuevo entre sí.

Semejantes defectos se encuentran a cada paso. Indiquemos que ellos también forman un tornillo (en este caso éste es derecho). Si ahora nos imaginamos que sobre la primera espira de dicho tornillo se precipitan los átomos de la sustancia capa por capa, como resultado obtenemos un largo tornillo con rosca a derechas (fig. 81, *b*). Este es precisamente el cristal cultivado. La vista desde arriba de este cristal se parece a una espiral muy bonita (fig. 82). Como ejemplo de esa especie en la naturaleza pueden servir las conchas de los moluscos.

Claro, no hay que pensar que en los cristales sólidos el tornillo se forma en el espacio sólo merced a los defectos. En algunos cristales, por ejemplo, en el cuarzo y cinabrio, la espiral se forma a causa de la disposición particular de los átomos en la red cristalina sin ninguna clase de defectos. Puede decirse que los cristales de este tipo, ilustrado en la fig. 81, *a*, poseen la espiral en cada célula de la red. Los átomos forman en la célula algo parecido a una escalera de caracol, y de estas semejantes células, lo mismo que los cubos estándar, se construye el edificio elegante del cristal. El paso del tornillo aquí es igual al tamaño de la célula o, con otras palabras, al período de la red cristalina. De la fig. 81, *a* queda claro que el paso del tornillo en un cristal con defecto efectivamente es igual a la distancia entre los átomos vecinos en una red cristalina sin defectos, o sea, al período de dicha red. Otro caso se nos presenta en el colestérico. Aquí el paso de la espiral *h* es muy grande en comparación con la distancia media entre las moléculas vecinas, y es igual, aproximadamente, al grosor *a* de las moléculas. Lo dicho está relacionado con que la formación de orientación twist de los ejes ópticos se provoca por pequeños, casi atómicos, salientes de las moléculas. Pero al mismo tiempo,

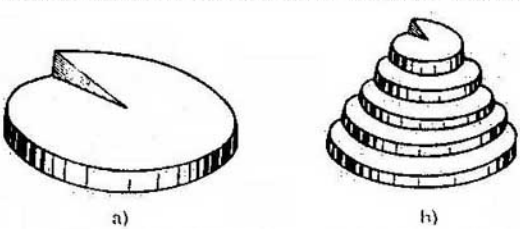


FIG. 81. *Crecimiento helicoidal de un cristal sólido si hay defecto:* a) defecto espiral; b) incremento de los planos atómicos.

la creación del propio eje óptico en una capa aislada del nemático depende, en lo principal, de los sectores básicos (planos) de las moléculas.

En nuestros razonamientos podemos ir más allá e interesarnos qué valor tienen el ángulo α y el paso de la espiral h en el colestérico. Por supuesto, estas magnitudes son los parámetros de la sustancia que consta de moléculas concretas. Pero se les puede evaluar aproximadamente. Por ejemplo, es natural considerar que el ángulo α es tanto menor, cuanto menor es la energía de la interacción del saliente de una molécula con la vecina. Al mismo tiempo el ángulo α debe disminuir, al aumentar la interacción de las partes principales de las moléculas. Por cuanto, en términos generales, el saliente contiene aproximadamente, un átomo, y la parte plana, unos 100 átomos, la relación de estas energías de interacción es de cerca de 0,01. Por eso el ángulo α constituye la centésima parte de una revolución completa (360°), o sea, cerca de 1°. A su vez, el paso de la espiral $h = (360°/\alpha)\ a$ para el valor típico de $a \sim 1$ nm debe ser de algunas centenas de nanometros. Esto significa que es comparable con la longitud de onda de la luz en la parte visible del espectro (desde el color rojo hasta el violeta), lo que determina, como veremos, los efectos ópticos pintorescos a observar en los colestéricos.

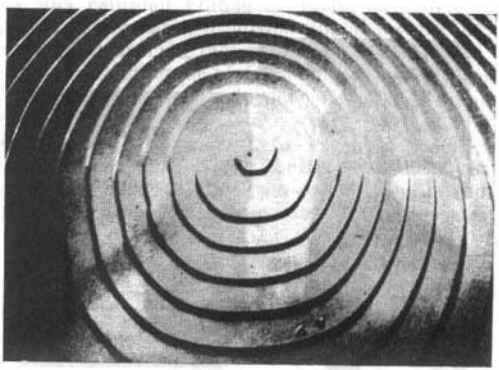


FIG. 82. *Este aspecto tiene el incremento helicoidal de un cristal real (la foto de G. G. Lemmléin).*

A propósito, obtendríamos la misma estimación del ángulo entre los ejes ópticos en las capas nemáticas vecinas si examinásemos la esencia geométrica de esta cuestión. En efecto, el ángulo α de hecho es igual a la relación entre el sector del arco en el que se sitúa el saliente espiral de la molécula, y el radio de este arco, que es igual aproximadamente a la longitud total de la molécula. En realidad semejante parte del arço es de centésimas de nanometro, y la longitud de la molécula, de varios nanometros. De aquí se desprende también el pequeño valor del ángulo α y el valor grande del paso de la orientación twist, respectivamente.

Nuestras conclusiones sobre las energías características de la interacción de las moléculas y los parámetros de la espiral colestérica permiten hacer otras deducciones muy importantes. Por ejemplo, es fácil comprender el por qué la estructura de capas del colestérico depende de una manera tan fuerte de diversas radiaciones, de la presencia de cualesquiera impurezas (de las materias extrañas, hablando más sinceramente), etc. En efecto, si la existencia de la espiral depende de un saliente insignificante en la molécula plana larga, no será tan difícil poner en peligro semejante existencia, destrozando este saliente. Son precisamente estas consecuencias de la radiación del colestérico, por ejemplo, por la luz ultravioleta. Ésta destruye los sectores espirales

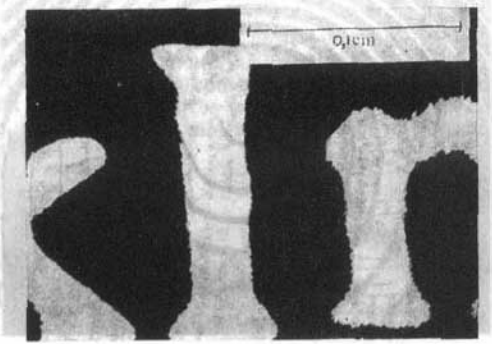


FIG. 83. *Película del colestérico decolorada mediante la luz ultravioleta.*

débiles de las moléculas, derribando los átomos de los salientes en los planos principales, o transforma las moléculas derechas en izquierdas y viceversa.

De esta manera, los sectores espirales de las moléculas bajo la radiación, pueden enderezarse. Cuanto más es la energía de algunos cuantos que caen en el saliente espiral, tanto más destrucción sufre, incluso hasta la desaparición total del tornillo. Cuanto más intensa es la radiación o cuanto más tiempo actúa, tanto mayor es el número de moléculas del colestérico que pierden sus propiedades espirales. Por ello, bajo las influencias de todas esas causas o, en otras palabras, bajo las reacciones fotoquímicas, el ángulo α se hace cada vez menor, mientras que el paso de la espiral, mayor. En fin de cuentas, el paso puede convertirse en infinito, es decir, el colestérico se transformará en un simple nemático.

La radiación es capaz de ejercer mayor influencia si la estructura de la molécula es tan débilmente asegurada que bajo la acción de la luz, se destruyen los enlaces entre los átomos incluso en el esqueleto principal de las moléculas. En este caso se dibilita intensamente la atracción mutua de los esqueletos: de los sectores planos y largos. Por ello resulta imposible aún la existencia del nemático, es decir, el colestérico se convierte en un líquido ordinario. Claro está que lo dicho transcurre cuando a causa de la radiación se acumula una cantidad grande de moléculas "defectuosas". Con ese fin es necesario, lo mismo que al fotografiar, elegir un tiempo de exposición indispensable.

Es muy fácil observar el fenómeno. Hace falta proteger contra la radiación la película del colestérico, dejando sólo los sectores elegidos, los que en resumidas cuentas perderán las propiedades del colestérico. Luego ubicando la película radiada entre los polarizadores cruzados, veremos el cuadro dado en la fig. 83. Las partes, no expuestas a la radiación, permanecerán claras, ya que en este caso la luz atravesará

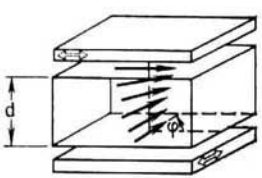


FIG. 84. *Giro de la polarización de la luz, al atravesar el rayo una capa del colestérico con un paso muy grande de la espiral.*

el sistema óptico, lo mismo que en la fig. 37, *b*. Los sectores expuestos se harán negros, puesto que en el líquido habitual no hay ejes ópticos y birrefringencia, por lo tanto, la luz pasa a través de éste sin variar la polarización y el segundo polarizador no deja pasar semejante luz.

La mezcla del colestérico con un líquido corriente o cualquier nemático, así como con otro colestérico que tiene un tornillo contrario, conduce a semejantes consecuencias. En este caso se debilita el papel de los sectores espirales que poseen las moléculas del colestérico a diluir. El paso de la espiral inicial del colestérico aumenta y, siendo la dilución aún mayor, se forma simplemente un nemático. La intensa dilución por un líquido corriente, en general, liquida naturalmente el eje óptico.

La información más precisa de cómo varía el paso de la espiral, sea cual sea la causa de esta variación, nos da el paso de la luz polarizada a través de una película del colestérico. Una de las propiedades más impresionantes es el giro de la polarización de la luz a medida de su paso en el grosor de la película.

§ 4. GIGANTESCA ACTIVIDAD ÓPTICA

En 1811 por primera vez se descubrió el giro de la polarización lineal de la luz en el cuarzo. El fenómeno consiste en que la luz, polarizada por cierta dirección, atravesando el cristal a lo largo del eje del tornillo, resulta ser polarizada en otra dirección que forma con la primera un ángulo φ (fig. 84). El ángulo φ es directamente proporcional al grosor del cristal. En general, ya hemos visto ejemplos del giro de la polarización y sabemos que está relacionado con la

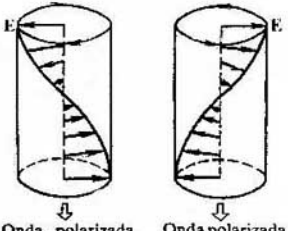


FIG. 85. *Ondas luminosas polarizadas a la derecha y a la izquierda: en cualquier punto del rayo el movimiento del vector* E *por el círculo ocurre de modo dextrógiro y levógiro, respectivamente.*

birrefringencia de la luz. En el caso, ilustrado por la fig. 29, el giro se efectuaba sólo siendo la disposición de los ejes del polarizador y cristal, así como el grosor del cristal determinados. Además el cristal no tenía ningún tornillo de ejes ópticos. Al contrario, en los casos dados en las figs. 30 y 37, *b* había una orientación espiral de los ejes ópticos, creada artificialmente. Estos ejemplos ya se parecen a lo que se observa en el cuarzo y el colestérico. Pero también existe una diferencia la cual consta de que en el nemático retorcido el paso del tornillo es muy grande, mientras que en el cuarzo el paso es de $\approx 5{,}4$ nm, y en el colestérico, de unos centenares de nanometros. Por eso la longitud de la onda luminosa en el nemático retorcido es mucho menor que el paso del tornillo; en el cuarzo, mucho mayor que él y en el colestérico es comparable con éste.

Para los fines científicos y prácticos hacen colestéricos (mejor dicho, mezclas colestéricas) con un paso muy grande de la espiral. Ya lo hemos mencionado. Sobre todo es muy sencillo fabricar ese material mezclando antípodas ópticos: colestéricos con tornillos de diferentes signos, pero con el mismo paso. Si los números de las moléculas derechas e izquierdas son estrictamente iguales, entonces, en esencia, esto ya no es un colestérico, sino un nemático. En efecto, semejante mezcla líquida es especularmente simétrica, porque la imagen en el espejo contiene la misma cantidad de semejantes moléculas izquierdas y derechas. Por eso el carácter espiral de las moléculas resulta ser compensado mutuamente y todas ellas tienen sus ejes largos orien-

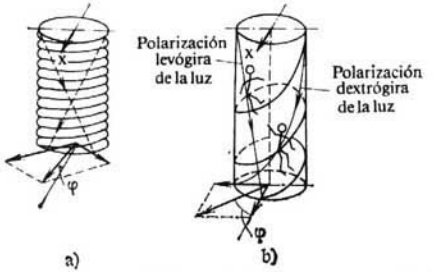


FIG. 86. *El pequeño paso de la espiral conduce a una insignificante diferencia en la propagación de las ondas con la polarización derecha e izquierda (a); cuando el paso es grande, la diferencia se hace esencial (b).*

tados en la única dirección. Pero esto es, en resumidas cuentas, un nemático. Si los números de las moléculas-antípodas son diferentes, por ejemplo, hay más moléculas derechas, la mezcla ya no será especularmente simétrica: la imagen en el espejo contendrá más moléculas izquierdas. En esa mezcla surge la espiral derecha de colestérico. En cambio si la diferencia de la cantidal de los antípodas es pequeña, la simetría por reflexión no se infringe fuertemente, por eso el paso de la espiral se hace grande.

Así, pues, sea que sobre la película del colestérico con un paso grande de la espiral incida perpendicularmente la luz. La luz está polarizada a lo largo del eje óptico del colestérico sobre la superficie superior de la película. ¿De qué modo se propagará la luz a través del colestérico? El rayo pasante se forma como resultado de la interferencia de la onda incidente y las ondas emitidas por los electrones de las moléculas bajo la acción del campo de la onda primaria. Puesto que los electrones se desplazan con mayor facilidad a lo largo de los ejes largos de las moléculas, el campo de la onda secundaria, emitida a una profundidad determinada de la capa colestérica, debe ser paralelo al eje óptico en dicha profundidad. Si la longitud de la onda es mucho menor que el paso de la espiral del colestérico, la concordancia de la propagación de las ondas primaria y secundaria, merced a la cual ellas se amplifican mutuamente, corresponde de hecho al giro del campo E en el rayo que atraviesa la capa. La polarización de la luz es paralela al eje óptico del colestérico en cualquier punto de la espiral. Los fenómenos de interferencia que suceden a distancias del orden de la longitud de onda, como si tuviesen tiempo para "seguir" el giro "lento" de los ejes L en el espacio y "sintonizarse" a dicho giro. De esta manera, pasando todo el grosor de la película, la luz resulta polarizada linealmente en la misma dirección que el eje óptico en la superficie inferior de la película.

Examinemos un caso inverso, cuando el paso de la espiral colestérica es mucho más pequeño que la longitud de onda. El campo E de la onda pasante es ahora inútil descomponerlo en dos componentes, paralela y perpendicular a cualquier eje óptico. Eso se podía hacer antes cuando dicho eje era el único para toda la capa del cristal líquido. Mientras que ahora hay una cantidad inmensa de semejantes ejes, orientados de diferente modo, y no se le puede preferir a ninguno de ellos. Para polarizar los rayos pasantes tenemos en nuestra disposición sólo dos posibilidades que no están

relacionadas de ningún modo con los ejes ópticos individuales del colestérico. Son los giros del vector del campo eléctrico alrededor del eje de la espiral colestérica bien de modo dextrógiro, bien levógiro. En otras palabras, dos rayos pasantes independientes pueden tener sólo la polarización circular (izquierda y derecha). En la fig. 29 ya trabamos conocimiento con la polarización circular.

Aquí quisiéramos señalar una particularidad. El caso es que la polarización izquierda y la derecha de la luz corresponden a un cuadro de la posición instantánea del vector **E** en el eje de los rayos luminosos. Siendo la polarización derecha, los extremos del vector **E** dibujan en el espacio una espiral derecha, y siendo la polarización izquierda, la espiral izquierda. Pero el giro de los vectores **E** durante un período de oscilación transcurre en una onda polarizada a la derecha en dirección levógira y en la onda polarizada a la izquierda, en sentido dextrógiro. Eso se ve de la fig. 85: sólo para semejantes movimientos circulares del vector **E** en el siguiente momento la luz llegará al nuevo punto con la dirección que **E** ha tenido en el punto anterior.

Las velocidades de los rayos luminosos con diferente polarización circular se distinguen un poco. El rayo de polarización izquierda tiene mayor velocidad en la espiral colestérica derecha que el rayo de polarización derecha. Es natural que un cuadro inverso se observa en la espiral colestérica izquierda. La causa de ello consiste en que en un rayo las oscilaciones secundarias del campo a lo largo de los ejes ópticos amplifican en cierto grado la onda primaria de polarización circular, y en el otro, la debilitan. Pero ya sabemos que el resultado de la interferencia de las ondas primaria y secundarias determina precisamente la velocidad de la luz en el medio. Sin embargo, la diferencia de la velocidad de los rayos luminosos es pequeña, ya que en la longitud de

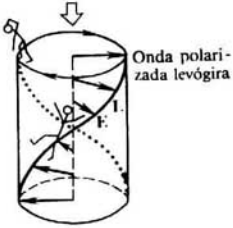


FIG. 87. *El paso de la luz con la longitud de onda igual al paso de la espiral, a través del colestérico.*

onda caben muchas espiras completas de la espiral colestérica, las cuales reaccionan casi de la misma manera a la influencia de la luz con polarización izquierda y derecha (fig. 86, *a*). La diferencia de la velocidad de las ondas de diversa polarización circular se hace notoria, si el paso de la espiral colestérica se diferencia poco de la longitud de la onda luminosa. En este caso aumenta intensamente el papel de las oscilaciones secundarias del campo a lo largo de los ejes ópticos. Por ejemplo, en la espiral derecha la emisión de las ondas secundarias transcurre con mucha más concordancia bajo la acción de la onda primaria de polarización izquierda, que a causa de la acción de la onda de polarización derecha (véase la fig. 86, *b*).

Todo lo que hemos dicho, tiene una importancia primordial para el giro de la polarización lineal de la luz a la salida de la película del colestérico. Si el paso de la espiral es pequeño, es decir, es pequeña la diferencia en las velocidades de dos rayos pasantes, a la salida de la película los vectores del campo girarán en los rayos en sentido dextrógiro y levógiro en un ángulo aproximadamente igual. Por eso la suma vectorial de los campos que nos dará de nuevo una luz linealmente polarizada, estará vuelta con respecto de la polarización a la entrada, en un ángulo pequeño φ (fig. 86, *a*). Al contrario, si el paso de la espiral y la diferencia en la velocidad de los rayos resultan ser grandes, los campos a la salida del colestérico girarán en sentido dextrógiro y levógiro en ángulos completamente diferentes. Por lo tanto, su suma vectorial —polarización a la salida— dará una vuelta con respecto de la polarización a la entrada en un ángulo notorio φ (fig. 86, *b*).

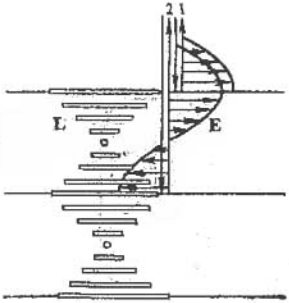


FIG. 88. *La reflexión selectiva surge al coincidir la longitud de la onda luminosa con el paso de la espiral del colestérico.*

Cuanto mayor es el grosor de la película, tanto mayor será el ángulo en que girarán los vectores del campo en ambas ondas, pero en este caso aumentará también el retraso de una onda con respecto a la otra. Por eso el ángulo φ es directamente proporcional al grosor de la película d. Suele tomarse la relación del ángulo φ a 1 cm de grosor. Es interesante comparar semejantes giros relativos de la polarización lineal de la luz en diversas sustancias. En las soluciones de la sacarosa y del ácido tartárico el valor de φ es, aproximadamente, de 1 grad/cm, en el cuarzo, cerca de 300 grad/cm. En los colestéricos ordinarios el valor de φ es de $\sim 10^5$ grad/cm. Esto testimonia de modo evidente el gran papel del paso de la espiral colestérica para el giro de la polarización de la luz visible. Recordemos que las longitudes de las ondas de la luz visible son comparables con el paso de los colestéricos.

El fenómeno del giro de la polarización de la luz se denomina *actividad óptica* de la sustancia. Este fenómeno, tan extremadamente sensible a cualesquiera variaciones de la estructura de la sustancia y de la interacción de las moléculas, nos ofrece una información valiosa de cómo están estructuradas las moléculas, de qué modo cambia su arquitectura a causa de las reacciones químicas y la polimerización. La actividad óptica se utiliza en diversos dispositivos ópticos (moduladores, interruptores, etc.), así como en calidad de un método muy preciso de determinación de los índices de refracción de diferentes rayos en un medio dado. Este método es 10 000 veces más exacto que otros conocidos procedimientos de la medición. Tiene gran importancia la actividad óptica de las moléculas biológicas, en particular, de las albúminas, que constan de aminoácidos con tornillos izquierdos. Esa selectividad de la estructura espiral de las biomoléculas hasta hoy día representa un enigma en el que rompen la cabeza los científicos. Todo lo dicho subraya sólo la valía de los cristales líquidos colestéricos, cuya actividad óptica es muy grande, para muchas ramas de la ciencia, la técnica y para la vida.

§ 5. REFLEXIÓN SELECTIVA DE LA LUZ

La reflexión selectiva de la luz por el colestérico es otro fenómeno peculiar estrechamente ligado con el fenómeno de la actividad óptica. La palabra "selectiva" no está por casualidad: el colestérico refleja en realidad la luz brillan-

te sólo de una longitud de onda λ escogida, igual al paso h de la espiral colestérica. De ahí proviene la riqueza de la escala cromática que atrae a todos los que observan los artículos de colestéricos en condiciones variables, tales como la temperatura, la carga mecánica, las impurezas y el campo electromagnético.

Ya en el parágrafo anterior prácticamente llegamos a la comprensión de la reflexión selectiva de la luz, al describir el paso de la luz linealmente polarizada a través del colestérico. Pues el rayo incidente no sólo penetra en la película en forma de dos rayos de diferente polarización circular, que se propagan de distinto modo en el colestérico, sino que se refleja de la película merced a la interferencia de las ondas secundarias. Esto ya lo conocemos, pero ahora discutiremos dicha cuestión con más detalle.

La fig. 87 ilustra de nuevo la espiral colestérica derecha, con más precisión, su semiespira. Sobre ella incide desde arriba un rayo luminoso. Se supone que la longitud de la onda y el paso de la espiral son iguales. ¿Qué pasará si la onda es de polarización izquierda, o sea, el vector **E** gira alrededor del eje del colestérico en sentido dextrógiro? Sea que en cierto momento el campo **E**, a la entrada de la película, coincida según la dirección con el eje óptico del colestérico. Entonces durante todo el período de oscilación, a medida de que la onda atraviese la película, el vector **E** en cada punto nuevo resultará vuelto en un mismo ángulo que el eje óptico del colostérico. Semejante concordancia asegura un paso libre de la luz a través de la película. Eso parece a un descenso cautivador sobre el pasamanos de una escalera

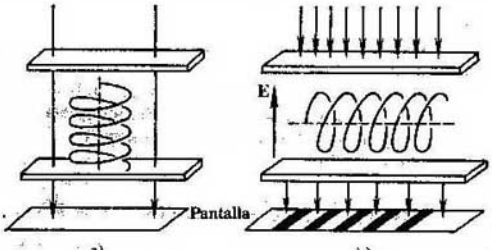


FIG. 89. *Reorientación del eje de la espiral del colestérico mediante el campo eléctrico:*

a) no hay campo; b) el campo supera el valor de umbral.

de caracol, cuando en su paso se realiza una vuelta completa alrededor del eje del tornillo.

A causa de la total ausencia de la concordancia entre la rotación del vector **E** en sentido levógiro (en la onda de polarización derecha) y la rotación del eje óptico en sentido dextrógiro, la onda de polarización derecha no atraviesa la espiral colestérica derecha. De esta manera, la onda luminosa de polarización derecha puede reflejarse sólo de un colestérico derecho, si su longitud es exactamente igual al paso de la espiral y la onda incide sobre la película a lo largo del eje de la espiral.

Es interesante que razonando de otra manera también podemos llegar a la misma conclusión. Recordemos el fenómeno de la interferencia de las ondas, reflejadas de las superficies inferior y superior de las películas finas. La película se consideraba fina si su grosor no se diferenciaba mucho de la longitud de la onda de la luz incidente. En dicho caso podemos decir que la película del colestérico es una pila de capas totalmente iguales, de $h/2$ de grosor. En efecto, el eje óptico gira en 180° a una distancia de $h/2$ a lo largo de la espiral del colestérico. Pero no hemos dicho en ninguna parte de que la dirección del eje óptico **L** y la dirección opuesta —**L** se diferenciasen por algo la una de la otra. Al contrario, el signo se le atribuía al vector **L** de modo arbitrario, es decir, las direcciones **L** y —**L** son equivalentes para los cristales líquidos. Por ello, en realidad, el giro del eje óptico en 180° significa el retorno a su anterior orientación.

Ya que todas las capas de un grosor de $h/2$ son absolutamente iguales, puede considerarse la reflexión de la luz de cada una de ellas como de la mencionada película fina. Cuando el paso de la espiral del colestérico es igual a la longitud de la onda de la luz incidente, el grosor de semejante película es exactamente igual a la mitad de la longitud de la onda. Puesto que la luz incide perpendicularmente sobre la superficie de la película, los rayos, reflejados de los límites inferior y superior de la capa, coinciden por la dirección con el eje de la espiral. Examinemos de qué modo interfieren estos rayos, es decir, cómo se suman los campos **E** de estas ondas (fig. 88). De la figura vemos que la onda *2* que penetró en la película fina, en su trayecto desde el límite superior al inferior y al revés, se retrasará de la onda *1* precisamente en una longitud de onda λ. En cambio, los campos **E** de ambas ondas a la salida del

colestérico son iguales por la magnitud y dirección. Por lo tanto, el campo total en el rayo reflejado es el doble mayor que el campo de cada una de las ondas, es decir, la intensidad de semejante rayo es cuatro veces mayor que la de una onda aislada. De este modo transcurre la amplificación de la luz reflejada a causa del fenómeno de la interferencia.

En la realidad, claro está, sólo en casos especiales y raros se eligen el paso de la espiral, la longitud de la onda y la polarización de la luz para satisfacer todas estas condiciones. Casi siempre sobre la película del colestérico incide la luz blanca natural que tiene cualquier polarización y cualquier longitud de onda. De toda esa abundancia de ondas el colestérico elige el mismo aquella onda que satisfaga todas las condiciones indispensables, y la refleja. Todas las demás ondas atraviesan la película del colestérico y si luego se absorben por cualquier material o se desvían de modo que no puedan volverse hacia atrás, veremos la película con el color de la onda reflejada.

No hay que pensar que sólo semejante cristal laminar es capaz de reflejar de manera selectiva la luz. Cualquier cristal refleja del mismo modo la luz. Pero en los cristales sólidos el grosor de equivalentes películas finas es igual al período de la red cristalina, o sea, a la distancia entre los átomos. Dicha distancia es por lo general, de décimas de nanometro. La radiación de esa longitud de onda se denomina radiación X. No lo podemos ver a simple vista. Se le

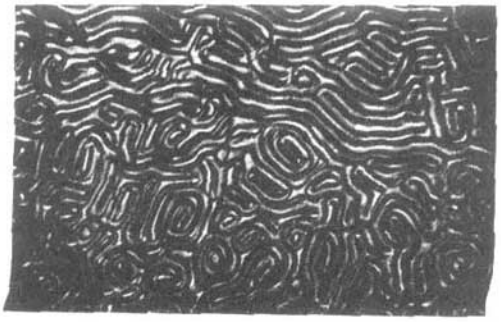


FIG. 90. *"Huellas dactilares": cuadro de la orientación de los ejes ópticos en el colestérico.*

puede "ver" mediante dispositivos especiales. Estudiando las reflexiones de los rayos X se descodifica con éxito la estructura más compleja de cualesquiera cristales.

La mayoría de los colestéricos reflejan la luz visible. El conjunto de colestéricos de diferentes pasos de las espirales pone en nuestra disposición un rico juego de colores: puros y brillantes. Esos colores, sin duda alguna, atraerán la atención de los pintores por sus posibilidades, pero a los pintores les asombrará el método de pintar con esas pinturas. Si las pinturas a las que todos estamos acostumbrados, hay que aplicarlas sobre un lienzo blanco, las capas de los colestéricos es necesario aplicarlas mediante un pincel a un recubrimiento negro que absorbe bien la luz. Sólo en este caso escintilarán con todos los colores del arco iris. La acción de los colorantes ordinarios se basa en un fenómeno completamente distinto, en la absorción selectiva de la luz (fig. 52).

La pintura colestérica tiene una peculiaridad más. El color del colestérico es el resultado de los esfuerzos colectivos, prácticamente, de todas las moléculas de la sustancia que forman en el espacio una espiral larga. Está claro que una molécula independientemente de las otras no puede hacer ninguna aportación al fenómeno en cuestión. Por ejemplo, el líquido ordinario, que consta incluso de antípodas ópticos, no posee reflexión selectiva. El carácter colectivo de la orientación de las moléculas en el colestérico, es, hablando en rigor, el que precisamente les da la posibilidad de construir una estructura calada a base de los ejes ópticos, o sea, la espiral colestérica.

Queda completamente claro que en los colestéricos, como en los nemáticos, es fácil dirigir la orientación de los ejes ópticos mediante un campo eléctrico. En este caso el mecanismo de la acción del campo sobre las moléculas no cambia. Por lo tanto, el campo eléctrico puede variar la espiral espacial del modo deseable. Por ejemplo, el efecto de Frederiks aplicado a los colestéricos se revela del modo siguiente. Si pulimos los cristales de la manera necesaria así que las moléculas se peguen paralelamente a los ejes del pulido, en la capa del colestérico, entre los cristales, el eje del tornillo se orientará perpendicularmente a las superficies de cristal (fig. 89, *a*). Sea que las moléculas se polaricen por el campo mejor de todo a lo largo del eje longitudinal. Entonces, aplicando a los electrodos transparentes de los que están cubiertos los cristales, una diferencia de po-

tencial del campo eléctrico que supera la tensión de umbral, podemos hacer girar el eje de la espiral del colestérico en 90° (fig. 89, *b*). En este caso el observador mira de lado la espiral a través de los polarizadores cruzados. En los lugares donde los ejes ópticos en la espiral sean estrictamente paralelos o perpendiculares al eje de uno de los polarizadores, el colestérico le parecerá oscuro al observador. En las demás partes la película del colestérico permanecerá clara. Al mirar la fotografía de la película colestérica que se

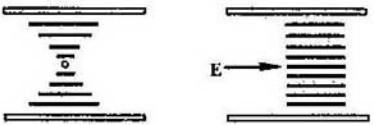


FIG. 91. *El campo eléctrico desenrolla la espiral colestérica:*

a) no hay campo; *b*) el campo supera el valor de umbral.

halló en dichas condiciones (fig. 90), el lector exclamará: "¡Pero eso son huellas dactilares!" Sí, en la actualidad semejantes imágenes de los colestéricos deformados tienen ese nombre.

Por las "huellas dactilares" juzgan sobre el valor del paso de la espiral colestérica que no cambia con el efecto de Frederiks. Pero la espiral se la puede no sólo hacer girar, sino también desenrollarla mediante el campo eléctrico, haciendo el paso grande cuanto se desee. La fig. 91 muestra de qué modo se realiza lo dicho. Aplicando el campo eléctrico de umbral E perpendicularmente al eje del torni-

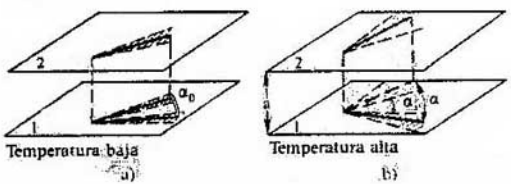


FIG. 92. *Puesto que los ejes de las moléculas no pueden formar un ángulo inferior a* α_0, *el calentamiento conduce a la reducción del paso de la espiral:*

el caso (*a*) corresponde a los choques térmicos débiles, y el caso (*b*), a los fuertes.

llo, obligaremos a las moléculas, polarizables a lo largo de los ejes largos, girar así que todas ellas, sin excepción alguna, se dispongan paralelamente al campo. De esta manera el colestérico se transforma en un nemático. Sin embargo, para los valores del campo más pequeños, el colestérico permanece siendo colestérico, aunque su paso sigue atentamente el campo, aumentándose con rapidez al elevar la diferencia de potencial aplicada. Es obvio que varían también continuamente las longitudes de ondas elegidas que se reflejan por el colestérico. Puede decirse que el pintor obtiene la posibilidad de variar la pintura en su cuadro, sustituyendo la pincelada por el suministro de una débil tensión. Nos queda añadir que tanto el efecto de Frederiks, como el desenrollo de la espiral se investigan hoy día de modo activo con el fin de aplicar los colestéricos en las pantallas planas cromáticas y en blanco y negro con mando electrónico.

§ 6. EN EL CALOR SE PONE AZUL Y EN EL FRIO, ROJO

Ya hemos mencionado varios métodos de dirigir los ejes ópticos del colestérico. Pero, puede ser que la variación del color del colestérico en función de la temperatura se convirtió en la más famosa y eficaz. El color de la película del colestérico depende de la temperatura en el mismo grado que el paso de la espiral es sensible al calentamiento o enfriamiento. Aquí también se observa una regularidad interesante. A temperatura alta, el colestérico en estado líquido ordinario es incoloro, mejor decir, es incolora la sustancia que a temperatura más baja pasa al estado colestérico y empieza a poseer la espiral colestérica. A temperatura de

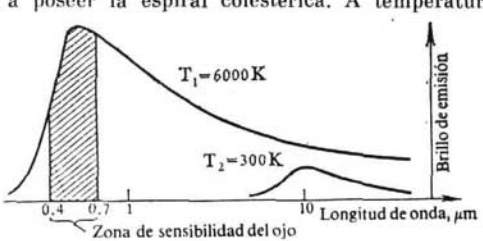


FIG. 93. *Espectros de radiación del Sol (T_1=6000 K) y del cuerpo humano (T_2=300 K).*

dicha transmisión, el colestérico se pone azul y al seguir enfriándolo, adquiere todos los colores del espectro desde el violeta y azul celeste hasta el rojo y amarillo. Esto significa que a medida del enfriamiento del líquido colestérico, el paso de la espiral aumenta, y al calentarlo, disminuye. Semejante comportamiento del colestérico no es difícil de explicarlo, ya que es similar al comportamiento de los cristales sólidos, al cambiar la temperatura.

Todos saben bien que al calentarse, los cuerpos se dilatan, mientras que al enfriarse, se comprimen. Por lo tanto, al crecer la temperatura, en cualquier cuerpo aumenta la distancia media entre los átomos o moléculas. Pero hasta llegar al punto de fusión el cristal sólido permanece siendo cristal, es decir, en un promedio, todos los átomos ocupan en la red cristalina un lugar totalmente determinado. Aumenta sólo el período de la red. ¿Por qué sucede lo dicho? La explicación es ésta: al aumentar la temperatura, crece el número de las desviaciones aleatorias de los átomos de sus posiciones de equilibrio bajo la influencia de los choques térmicos. Puesto que esas desviaciones son totalmente caóticas y siguen cualquiera de las direcciones, su valor medio es igual a cero, y los átomos, en término medio, quedan en sus sitios. En cambio, las distancias a que se apartan los átomos de sus posiciones de equilibrio a una u otra parte, aumentan al calentarse. Pero bien sabemos que los átomos no pueden acercarse uno al otro a distancias tan pequeñas como se desee, no pueden penetrar uno en otro: les estorba, por ejemplo, una fuerte repulsión de las nubes electrónicas. Surge, a su manera, una incompatibilidad de las propiedades de los átomos y de la red con una distancia media invariable entre los átomos.

La contradicción es ésa: por una parte, las desviaciones casuales se hacen cada vez mayores, es decir, los átomos deben acercarse mutuamente cada vez más durante los choques térmicos caóticos, pero por otra parte, a los átomos les cuesta mucho hacerlo. El cristal se libra de esta contradicción de modo muy sencillo, a saber: aumenta el período de su red, que es igual a la distancia entre las posiciones de equilibrio de los átomos. Vale decir que, por regla general, este aumento es insignificante: al calentar en un grado, las dimensiones del cuerpo aumentan en una millonésima de su valor inicial. Semejante dilatación térmica con frecuencia ni la notamos. Tampoco notaremos la dilatación del colestérico.

No obstante, la disminución del paso de la espiral al aumentar la temperatura, que se observa a simple vista, es el resultado de la dilatación térmica. Es verdad que ésta es peculiar. Es que ahora debemos observar no sólo la distancia media entre los centros de gravedad de las moléculas, sino también (¡de mucha importancia!) el valor medio del ángulo entre los ejes ópticos en las capas nemáticas finas, vecinas. Antes ya habíamos estimado el valor de dicho ángulo α, igual, aproximadamente, a 30′. Esta estimación se realizó a temperaturas moderadas, cuando los choques térmicos no eran tan considerables. Puede considerarse aproximadamente que 30′ es el ángulo mínimo α_0 al que se pueden aún acercar los ejes largos de las moléculas, situadas en las capas nemáticas finas vecinas. Al mismo tiempo, al calentar la sustancia deben aumentar las desviaciones de los ejes de las moléculas con respecto a sus posiciones de equilibrio a causa de los choques térmicos casuales. Dichas posiciones de equilibrio se determinan por los ejes ópticos **L** y las oscilaciones caóticas de las moléculas alargadas con relación a las direcciones **L** transcurren principalmente en el plano de las capas nemáticas (fig. 92).

Así, surge la conocida contradicción, pero ya respecto a la orientación promedia de las moléculas y sus desviaciones casuales de ésta. En el colestérico ésta se liquida mediante el aumento del ángulo medio α entre los ejes ópticos vecinos $\mathbf{L}_1$ y $\mathbf{L}_2$. Pero el aumento del ángulo α, quedando prácticamente invariable la distancia entre las capas nemáticas finas vecinas, significa que el giro del eje óptico en 180° tendrá lugar en una pila más fina de semejantes capas. Ello significa que el grosor de dicha pila igual al semipaso de la espiral, disminuirá. Así sucede la reducción del

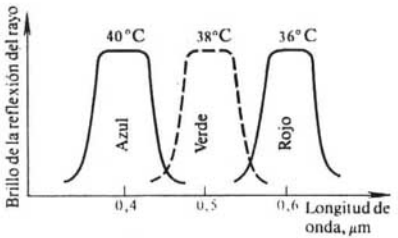


FIG. 94. *A distintas temperaturas el colestérico refleja selectivamente las distintas longitudes de ondas.*

paso del colestérico al aumentar la temperatura, la espiral como si se comprimiese a lo largo del eje del tornillo. Es obvio que cerca de la temperatura de fusión del colestérico en un líquido corriente, los choques térmicos son los más fuertes, y por lo tanto, el paso de la espiral se hace el más corto *). Por ello en este caso el colestérico refleja las ondas luminosas más cortas: la película se pone de color azul.

En los colestéricos ordinarios el paso de la espiral varía en centenares de nanometros al variar la temperatura en unos cuantos grados. Esto significa que la película de semejante sustancia, calentada en varios grados, adquiere todos los colores del arco iris. Pero existen materiales aún más extraordinarios, por lo general, son mezclas de las sustancias colestéricas que en el intervalo de 10^{-2} e incluso de 10^{-3} de grado, muestran todos los colores del espectro. Tal enorme sensibilidad del colestérico, ya comparable con las consecuencias de aislados choques térmicos, indica las posibilidades extraordinarias de esas sustancias, cuyas capas de un grosor de sólo de 0,01 mm sirven hoy en día de termoindicadores imprescindibles.

§ 7. EL TERMOVISOR DE CAPA FINA

Mirando al mundo con ojos bien abiertos y percibiendo con su ayuda el enorme volumen de todo género de información, rara vez nos paramos a pensar ¿qué es el ojo? ¿cuáles son sus cosas buenas y cuáles son las malas? Claro está, que tenemos en cuenta no tanto la forma o el color e incluso no las señales misteriosas que diferencian a Miki Morózov en el famoso retrato de V. Serov del retrato de Repin "El muzik con el mal de ojo". Hablamos sobre las características del ojo como un dispositivo óptico.

El hombre vive en la Tierra, alumbrada por el Sol, cuya temperatura de la superficie es aproximadamente de 6000 K. Cualquier cuerpo calentado hasta esta temperatura emite ondas electromagnéticas con un conjunto (espectro) ancho de longitudes de ondas cerca de $\lambda_{max} = 0{,}5$ μm (fig. 93). En el proceso de la evolución los órganos de vista de la persona (y también de muchos animales que velan de día y duermen de noche) adquirieron una propiedad notable para

*) Ese comportamiento es típico para las sustancias con una clase de moléculas. En las mezclas de distintas sustancias se observa también el cuadro inverso, lo que está relacionado con una interacción más compleja de moléculas de diferente tipo.

captar la emisión precisamente en el intervalo de la longitud de ondas desde 0,4 hasta 0,7 μm, con la particularidad de que la sensibilidad del ojo de la persona a la emisión visible (la luz) es extraordinariamente alta. El ojo, además, se adapta fácilmente a los niveles de alumbración bajos y altos y tiene una velocidad de funcionamiento relativamente alta (cerca de 40 ms), conmensurable con el tiempo de la reacción de la persona al ambiente y por eso bastante para su vitalidad. Parece, ¿qué es lo que le falta más a la persona? Pues no... El hombre quiere ver el movimiento de las partículas rápidas en los aceleradores, fotografiar el vuelo de la bala, medir la velocidad de las transformaciones químicas ultrarrápidas de la sustancia. Crea, además, "ojos" de poca inercia, o sea, convertidores de imágenes fotoelectrónicos. El hombre quiere investigar la luminiscencia ultradébil de los microorganismos y confecciona unos fotomultiplicadores especiales que registran los cuantos de luz (fotones) aislados. Y por fin, el hombre quiere ver en la oscuridad...

Todos los cuerpos calentados emiten una radiación electromagnética, con la particularidad de que cuanto más frío es el cuerpo, tanto menor es la intensidad de emisión y tanto más lejos se desplaza el máximo de su espectro a la zona de ondas largas. Existe una relación muy simple $\lambda_{max} \times T = \text{const}$ (la ley de Wien) por medio de la cual es es muy fácil establecer dónde se halla el máximo de radiación del cuerpo a temperatura T, si el valor de la constante se toma

FIG. 94a. *Mediante el colestérico se puede ver la distribución de la temperatura sobre la piel del hombre.*

del ejemplo anterior con el Sol: const = 600 K·0,5μ = = 3000 K · μm. Por ejemplo, el cuerpo humano que posee una temperatura de 37+273=310 K, emite rayos infrarrojos con el máximo alrededor del valor de $\lambda_{max} \approx 10$ μm (fig. 93).

Si pudiéramos ver los rayos infrarrojos o, como se dice, rayos térmicos, pues hasta en una noche cerrada aparecería ante nosotros un cuadro fantástico de las siluetas de la gente en movimiento, de los motores en funcionamiento, de las capas del aire calientes y frías que se desplazan (acordémonos de la convección), etc. Podríamos ver la huella térmica del submarino disimulado bajo el grosor del agua o seguir con la vista por los gases de escape calientes la trayectoria del avión que voló hace mucho tiempo atrás.

Existe todo un círculo más de problemas que pueden resolverse con la ayuda de la termovisión. Por ejemplo, hace falta comprobar el régimen térmico de un circuito eléctrico enorme para saber si hay en algún sitio elementos recalentados. Uds. comprenden que es absolutamente imposible medir con el termómetro cada uno de los miles de puntos que nos interesan o cubrir todo el circuito con captadores complementarios de temperatura. Así mismo para el diagnóstico médico es importante saber la distribución de las temperaturas por toda la superficie del cuerpo humano, lo que permite descubrir en las etapas iniciales los tumores o los procesos de inflamación. El saber de los regímenes térmicos de distintas instalaciones se necesita en la metalurgia, industria química, construcción de aviones, etc. En todos estos casos se utilizan termovisores, o sea, las instalaciones de televisión que funcionan en la banda de los rayos infrarrojos.

¿Cómo se hace esto? Por desgracia aún no se han construido las cámaras de televisión emisoras que sean sensibles a las longitudes de ondas superiores a 3 μm. Por eso no se puede lograr toda la imagen por completo. Pero hay aparatos semiconductores, capaces de crear una señal eléctrica, proporcional a la intensidad de la emisión infrarroja que incide sobre ellos. Por lo general, es el cristal, ubicado en una cámara de temperaturas bajas (criostato) enfriada por nitrógeno líquido o helio, con fin de subir su sensibilidad. Este aparato puede reproducir toda la imagen sólo por elementos con ayuda de la instalación de exploración. Por ejemplo, ante el receptor de la emisión se coloca un objetivo y balanceándolo mecánicamente a lo largo de las

coordenadas x e y, como un radar, se "palpa" sucesivamente todo el objeto. La señal del receptor después se utiliza para la dirección de la brillantez del rayo de un simple tubo de rayos catódicos (sólo con exploraciones lentas del rayo que van al tacto con las oscilaciones del objetivo). Y observando el tubo corriente el hombre sabe leer la imagen con sus propios ojos.

Como se ve, dicho termovisor tiene bastantes defectos: un sistema muy grande que exige refrigeración hasta las temperaturas bajas, además, que funciona muy despacio a causa de la exploración mecánica de la imagen en la entrada. ¿Cuáles son las otras posibilidades?

Pues aquí tenemos que recordar las propiedades singulares de los cristales líquidos colestéricos. Nos hace falta utilizar la dependencia térmica de sus propiedades ópticas sobre las cuales se ha hablado más arriba. Vamos a construir nosotros mismos un termovisor. Así, pues, queremos registrar un cuadro de la distribución de las temperaturas en la superficie de un cuerpo calentado. Aquí puede haber dos variantes.

Si el objeto permite el contacto directo con el cristal líquido, lo mejor de todo es aplicar una capa de cristal líquido al objeto. Supongamos que el objeto sea un cuerpo humano con una temperatura, digamos, de 36 °C a 40 °C. Elijamos una mezcla colestérica de modo que a temperatura de 36 °C la banda de reflexión selectiva de la luz coincida con la longitud de la onda roja (0,6 μm), y de 40 °C, con la longitud de la azul (0,4 μm) (fig. 94).

Entonces a esta distribución de temperaturas le va a corresponder toda la gama de colores desde el azul hasta el rojo y ya podemos localizar la posición de las partes calientes (azules). Desde el punto de vista técnico esto se hace así: primero, la piel humana se cubre de una pintura negra y sobre ella se aplica una capa de cristal líquido. La

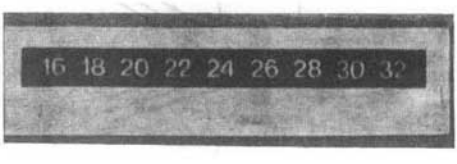


FIG. 94b. *Las películas de los cristales líquidos colestéricos se emplean en los termómetros de cifras.*

presencia de la pintura nos facilita la observación de la reflexión selectiva del cristal líquido. Es evidente que al hombre le es desagradable este colorido, por eso los investigadores elaboran unas películas especiales de muchas capas que incluyen en sí una base negra (una capa de cristal líquido y otra capa de protección de un polímero). Esas películas se pueden simplemente aplicar, en aquellas partes de la piel que se desea observar, con la particularidad de que se puede hacerlo reiteradamente. A veces, es importante determinar la diferencia mínima de las temperaturas en décimas y hasta centésimas de grado. En este caso se eligen mezclas extrasensibles, cuya banda de reflexión "recorre" todo el intervalo visible, al cambiar la temperatura en 0,1 °C (véase la fig. 94a).

El mismo método de medida de las temperaturas puede realizarse en el caso de los circuitos integrados planos o en instalaciones industriales, utilizados en la tecnología química. A base de este principio funcionan los ordinarios termómetros de casa (véase la fig. 94b).

La segunda variante del termovisor se tiene que utilizar donde se excluye un contacto directo del cristal líquido con la fuente de émisión térmica. Por ejemplo, el circuito electrónico puede contener piezas de radio grandes y pequeñas, alambres y otros elementos voluminosos. El láser puede ser fuente de emisión infrarroja y entonces surge el problema de registrar la distribución de la intensidad por la sección de su rayo. En estos y muchísimos más casos se utiliza el circuito del termovisor, representado en la fig. 95. Este a título de elemento principal tiene una película fina de un cristal líquido colestérico aplicada sobre una película negra que es el absorbente de la emisión. El ingeniero, cuando diseña tal aparato, razona aproximadamente de este

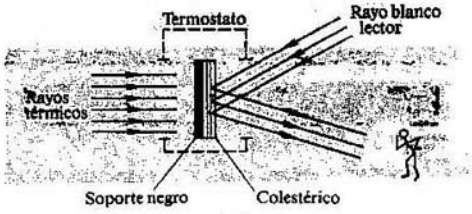


FIG. 95. *Termovisor a base del colestérico.*

modo: el objeto emite poca energía, entonces, es necesario utilizarla por completo. Ante todo, el objetivo tiene que ser hecho de un material especial, que sea transparente en la banda infrarroja (por ejemplo, fluoruros de litio, calcio, bario). Se puede utilizar también los objetivos especulares. Después, toda la energía radiante que pasó por el objetivo, debe absorberse en la película. Por eso la película no puede ser demasiado fina. Tampoco debe ser demasiado gruesa ya que será imposible calentarla mediante la emisión a causa de la capacidad térmica grande. La película de cristal líquido no puede ser muy fina además, porque la reflexión selectiva surge sólo en caso de que en el grosor de la capa caben por lo menos varias espiras de la espiral colestérica.

Resulta que las películas con un grosor total del orden de algunos micrometros son las más preferibles. Con su ayuda se logra resolver aquellos problemas sobre los que se habló más arriba. La ventaja más grande de dichos termovisores es la sencillez de su construcción, pero los mismos ceden ante los de exploración en sensibilidad. En la actualidad se hace un trabajo grande en busca de nuevos cristales líquidos con una dependencia térmica más estricta del paso de su espiral.

Capítulo V
CRISTALES LÍQUIDOS PARCIALMENTE SÓLIDOS

Todo lo explicado hasta ahora sobre los cristales líquidos se refería a los líquidos especiales, los cuales se caracterizan por el orden estricto en la orientación de las moléculas. Pero ningún lugar determinado o, en otras palabras, ninguna posición de equilibrio están reservados para las moléculas tanto en los nemáticos, como en los colestéricos. Sin embargo, la lista de los cristales líquidos sólo se abre con los estados nemático y colestérico. Resulta que a medida que se enfría una misma sustancia, pueden observarse cada vez más nuevos estados de la sustancia, que ya no son completamente líquidos, pero tampoco son sólidos por completo. Estos también son cristales líquidos pero de un género especial. Ellos se portan como cristales sólidos sólo según direcciones enteramente determinadas, o sea, elegidas en el cuerpo. Antes de estudiarlas, recordemos cuál es la estructura del cristal corriente.

§ 1. EL CRISTAL SÓLIDO ES TRIDIMENSIONAL

Toda la diversidad del mundo de los cristales que vemos está relacionada con 230 procedimientos según los cuales se puede distribuir los átomos en la red cristalina. Se sobreentiende que la red tiene obligatoriamente tres designadas direcciones independientes a lo largo de las cuales los átomos periódicamente ocupan sus sitios, y la red posee en total una simetría. La noción de la simetría existe en nuestra imaginación como una señal de belleza interna, concordancia y equilibrio de las proporciones y partes que componen un todo entero armónico. Gracias al equilibrio de las fuerzas, los átomos y las moléculas se ponen en el cristal según filas, columnas y capas regulares. Por diferentes direcciones las distancias y las fuerzas de interacción entre las partículas, de las que se forma el cristal, pueden ser distintas.

Por eso el cristal crece con una velocidad diferente en distintas direcciones y en resumidas cuentas se forma un poliedro. En las aristas se precipitan y se sujetan cada vez nuevas partículas, las cuales incrementan capa por capa las aristas, conservando en el cristal su propia simetría (fig. 96).

Las formas geométricas de los cristales crecientes nos muestran de este modo los procedimientos de disposición interior de los átomos o, en otras palabras, los tipos de la simetría espacial. Hablando con propiedad, el número men-

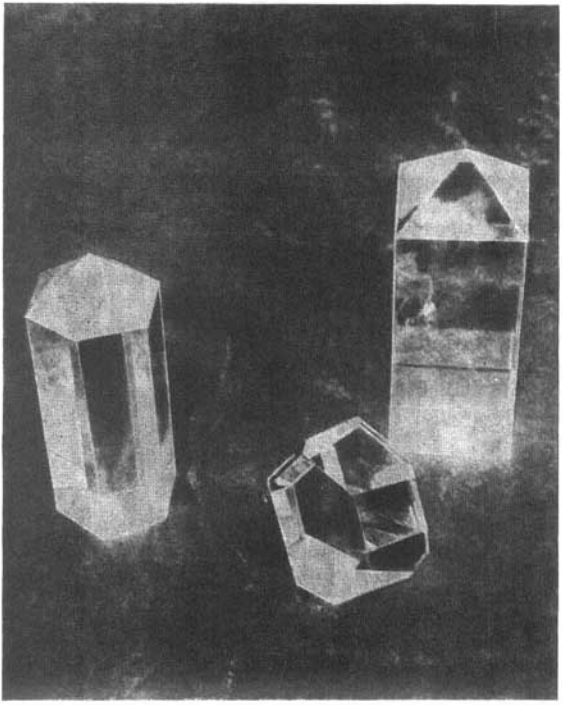


FIG. 96. *Poliedros de los cristales sólidos.*

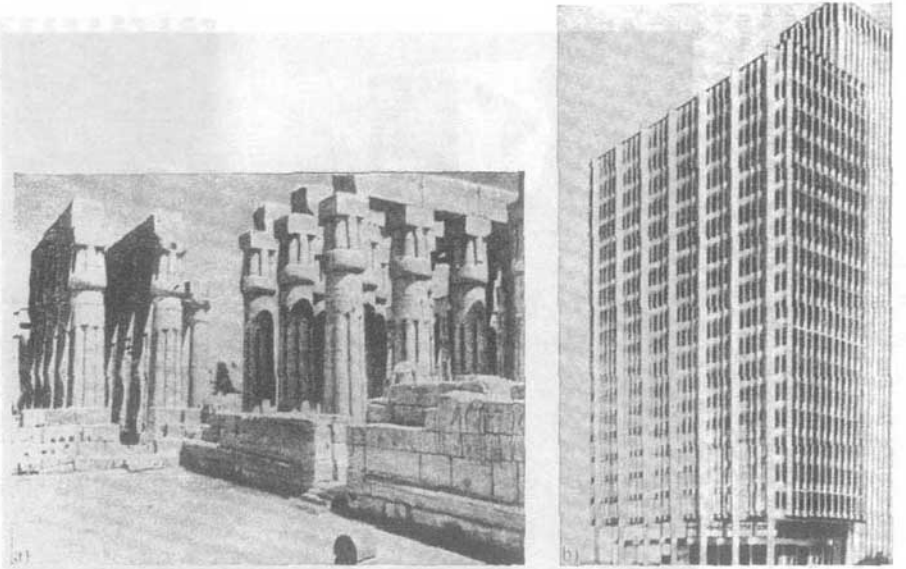


FIG. 97. *El templo del Amón en Luxor construido en el siglo XV antes de nuestra era (a), es interesante compararlo con el ejemplo de la arquitectura moderna (b).*

cionado 230 es el número de los posibles tipos de simetría. La ciencia que estableció éste y otros aspectos muy interesantes de la estructura de los cristales y que en general estudia la gráfica de las redes cristalinas se denomina *cristalografía*. Un procedimiento muy potente de la investigación en esta ciencia es el alumbramiento del cristal con chispas brillantes de los rayos X. Por las reflexiones intensas de esta emisión de las capas finas dentro del cristal (el espesor de estas capas es del período de la red) se juzga sobre la estructura interior de la red de los átomos. Este es un método muy exacto y seguro de estudiar la simetría.

Los átomos y las moléculas, en general, se disponen regularmente en la red, porque precisamente esta disposición es para ellos la más económica desde el punto de vista energético. En estado de equilibrio el sistema posee energía mínima. Si la temperatura está lejos del punto de fusión, es decir, los choques térmicos son débiles, el átomo o la molécula se adhiere sólidamente con sus vecinos más cercanos, pero de modo que los gastos de la energía en esta cohesión sean mínimos. Si esto se puede hacer en un sitio, entonces las partículas se comportarán del mismo modo en cualquier otro sitio del cristal. La exigencia energética principal aquí es que cada partícula tiene que estar en condiciones iguales. Los ejemplos evidentes de una construcción económica y racional nos los da la arquitectura antigua (fig. 97, *a*) y la arquitectura moderna que por desgracia a veces es demasiado impersonal (fig. 97, *b*). Un ejemplo no menos impresionante son los panales construidos por los abejas instintivamente. Pero a pesar de todo, el refinamiento del reino mineral al edificar las estructuras cristalinas sorprende nuestra imaginación.

Las fuerzas que retienen cada átomo en su sitio de la red tridimensional, son de distintos tipos. A veces son simplemente las fuerzas de atracción y de repulsión entre los iones en dependencia de sus signos. Además los iones se forman debido a que uno de los átomos entrega su electrón al átomo de otra clase como, por ejemplo, en la sal ordinaria se obtiene un ion positivo de sodio y un ion negativo de cloro. En otros cristales el enlace de los átomos no es tan simple: resulta que los electrones pueden pertenecer simultáneamente a dos átomos, como por ejemplo en el diamante. Es difícil romper semejante enlace electrónico. Tenemos derecho a concluir que estas fuerzas garantizan la solidez elevada de la red cristalina. Sin embargo, más a menudo se

encuentra la variante mixta de interacción, cuando los átomos están acoplados parcialmente, como en la sal de cocina y en parte como en el diamante. Tales son los cristales que no son conductores de la corriente eléctrica. En los metales, es decir, en los cristales que son conductores de la corriente eléctrica, los electrones generalmente pierden a sus amos concretos, o sea, sus átomos, y componen un conjunto unido perteneciente a todo el cristal en total.

Pero existen cristales denominados *moleculares*, en los cuales las fuerzas de interacción entre las partículas no se parecen a las mencionadas ahora mismo y son muy peculiares. El caso es que aquí la red está formada por moléculas, cada una de las cuales ocupa su sitio determinado. Los átomos en cada molécula están acoplados tan sólidamente como en el diamante. Los electrones de la nube electrónica de la molécula no son capaces de salir y pasar por lo menos parcialmente a disposición de la molécula vecina. Por eso en estos cristales las moléculas interaccionan entre sí con ayuda de un mecanismo, sobre el cual ya hemos hablado cuando estudiamos las causas de existencia de los cristales líquidos. La esencia del mecanismo consiste en la formación en las moléculas neutrales dipolos eléctricos instantáneos que se atraen entre sí y, por consiguiente, a las moléculas en total. Si se les enfría muy fuerte a los cristales líquidos, ellos se transforman precisamente en semejantes cristales moleculares con una red tridimensional.

En tanto que las fuerzas de atracción en los cristales moleculares son bastante débiles, la resistencia de estos sólidos no es muy alta. Recuérdense por lo menos el azúcar y la parafina que se derriten fácilmente. Pero esta debilidad de los enlaces tiene en sí muchas posibilidades para la diversidad de construcciones de moléculas. En realidad, abasteciendo a las moléculas de algunos elementos complementarios que garanticen al menos una mínima amplificación de la atracción de las moléculas, podemos hacer el cristal más sólido si no es en las tres dimensiones, por lo menos en dos o una direcciones escogidas. Además, cambian las condiciones de observación del orden en la orientación de las moléculas: éste se hace más diverso. Uno u otro modo de construcción y la orientación de las moléculas se determina ahora por el estatuto interno del cristal, o sea, por su simetría, y las instrucciones para la construcción concreta nos la da la temperatura.

Cuanto más complicada es la molécula, cuanto más sa-

lientes, retoños y pequeñas peculiaridades tiene, tanto más tiempo resiste el cristal molecular la influencia térmica. Al aumentar la temperatura, el cristal pierde el orden en sus capas, columnas y filas gradualmente, paso por paso, en dependencia de la dirección en la cual se rompe el eslabón más débil. En este caso la orientación de las moléculas o se somete al orden común, o pasa paulatinamente al caos. El caos completo tanto en posiciones, como en orientaciones significa la fusión en un líquido habitual. El caos sólo en las posiciones de las moléculas en todas las tres dimensiones corresponde a los estados del nemático o del colestérico. El caos en las posiciones sólo en dos dimensiones significaría que habría capas finas líquidas que formen en la tercera dimensión una red cristalina con eje único (fig. 98, *a*).

El caos en las posiciones de las moléculas sólo en una dirección significaría que habrá filas líquidas o "hilos" que formen en las restantes dos dimensiones una red periódica (fig. 98, *b*). Las redes periódicas formadas tanto por hilos líquidos, como por capas líquidas deben naturalmente poseer una solidez de los cristales aunque no en todas las dimensiones. Así, la red de los hilos líquidos es sólida en dos direcciones perpendiculares a los hilos. La red de las capas líquidas manifiesta la solidez sólo en una dirección que es perpendicular a las capas. Cuando hablamos sobre la solidez y sólidos, habitualmente tenemos en cuenta que el material manifiesta elasticidad, es decir, restablece sus dimensiones y forma después de quitar la carga. Conforme a los discuti-

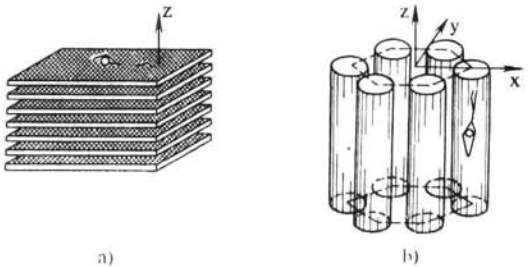


FIG. 98. *Las redes cristalinas pueden existir en una (a) o dos (b) dimensiones, en este caso las capas finas y las columnas son líquidas.*

dos cristales parcialmente sólidos, esto significa que la red de hilos es elástica en el plano, al que atraviesan los hilos. y la red de las capas es elástica a lo largo del eje en el cual está enhebrada la pila de capas.

A lo largo de las direcciones escogidas —los ejes cristalinos— en estos cristales insólitos acciona la ley de Hooke bien conocida por nosotros, o sea, la ley más principal de la elasticidad. La ley afirma que el alargamiento relativo, es decir, la relación del alargamiento de la parte del cuerpo Δc respecto a su longitud c, es proporcional a la fuerza F que acciona sobre la unidad del área del cuerpo:

$$F = C \frac{\Delta c}{c}.$$

El coeficiente de la proporcionalidad C se denomina *módulo de elasticidad*. En el caso ilustrado en la fig. 98, *a* la ley de Hooke actúa a lo largo de la dirección z, y en el caso (*b*) a lo largo de las direcciones x e y. Si en el caso (*a*) la fuerza acciona a lo largo de capas líquidas, en estas direcciones la ley de elasticidad no funciona: el cuerpo aquí fluye como un líquido viscoso. La misma fluidez la posee el cuerpo en el caso (*b*), cuando sobre éste actúa una fuerza dirigida a lo largo de los hilos líquidos.

De este modo, los sistemas de las capas e hilos líquidos son muy peculiares. Hablaremos ahora sobre ellos con más detalle.

§ 2. RED SÓLIDA DE HILOS LÍQUIDOS

De todos los cristales líquidos parcialmente sólidos la red de los hilos líquidos parece la más cercana según su estructura al cristal sólido por completo. Es que en este caso sólo falta la solidez en la dirección única. Parecería muy fácil encontrar este estado cristalino en la naturaleza. Pero no había manera. Durante mucho tiempo la naturaleza no les daba a los científicos estos materiales y dicho modelo del cristal predicho por los físicos era puramente especulativo. Ello continuó hasta 1977, cuando los científicos hindúes obtivieron en su laboratorio las moléculas en forma de discos. Ya hemos hablado sobre esta forma de moléculas (fig. 9, *b*). Resultó que precisamente estas moléculas se reúnen en columnas o hilos líquidos con diámetro aproximadamente igual al de la molécula-disco.

La estructura de la red cristalina correspondiente está

mostrada en la fig. 99. Préstese atención a que en cada columna los discos de las moléculas son aproximadamente paralelos mutuamente, como en el nemático, y las distancias entre los discos son completamente arbitrarias. Esto significa que los discos se mueven libremente a lo largo de las columnas que precisamente por eso pueden denominarse hilos líquidos, y con más precisión, columnas nemáticas. Las mismas columnas nemáticas se sitúan en el espacio de manera estrictamente rígida. Todas ellas son mutuamente paralelas y forman una red hexagonal en el plano xy.

Sin embargo, es interesante ¿por qué ocurre eso? ¿Qué fuerzas y qué detalles de la estructura de las moléculas favorecen a las construcciones semejantes de las partículas? A estas preguntas se puede responder con seguridad que en dicha construcción los discos planos no figuran casualmente. En efecto, esta forma de las moléculas permite sacar las siguientes conclusiones. La atracción mutua de dos moléculas, siendo la distancia invariable entre los centros de los discos, será máxima, cuando los discos sean paralelos y estén situados uno por encima de otro. La atracción será mínima cuando los discos se encuentren en un plano. Esto está relacionado con el hecho de que en el primer caso prácticamente todos los atomos (dos a dos) de dos moléculas se hallan a una distancia igualmente cercana uno de otro y en el segundo caso, se sitúan cerca uno de otro sólo los átomos extremales (fig. 100).

Las fuerzas de repulsión también son distintas para diferentes posiciones mutuas de los discos. De la fig. 100 se ve que en el caso (a) los discos pueden acercarse uno a otro, sin repulsión, a una distancia mucho menor que en el caso (b). Esto está relacionado con que el diámetro de los discos es mucho más grande que su grosor. De este modo, siendo la distancia entre los centros de masas la misma, las molé-

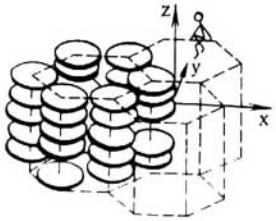


FIG. 99. *Las columnas nemáticas de moléculas en forma de discos.*

culas en las situación (*a*) se atraen fuertemente, pero se repelan débilmente, mientras que en la posición (*b*) las moléculas se atraen débilmente, pero se repelan fuertemente. En el cristal molecular tridimensional también pueden escogerse unas columnas de moléculas, pero en estas columnas, las últimas forman una fila periódica, ya que las interacciones de las moléculas, principalmente las fuerzas de atracción, resisten bastante bien los choques térmicos. Las mismas columnas —las filas periódicas— componen una red regular hexagonal, en lo fundamental a causa de las fuerzas potentes de repulsión. Sabemos que hasta las bolitas de acero habituales forman una red regular si no se sacude fuertemente el cajón con ellas.

Aumentando la temperatura, las fuerzas de atracción de las moléculas en las columnas, al fin y al cabo no podrán retener los discos en lugares fijos, es decir, las filas periódicas se transformarán en los hilos líquidos, o sea, en columnas nemáticas. Pero la misma distribución de las columnas en la red regular aún no sufre cambios en tanto que este orden está relacionado con otras fuerzas que son las fuerzas de repulsión. Al calentar más, ya las fuerzas de repulsión no pueden asegurar el orden estricto en la disposición de las columnas, o sea, la red en dos dimensiones se derrite y se forma un nemático tridimensional que fluye en cualquier dirección, conservando el paralelismo de los discos. La red de hilos líquidos puede compararse con un haz de tubos de paredes rígidas, por los cuales corre el nemático y la formación del nemático en tres dimensiones corresponde a que estos tubos se revientan al calentarlos fuertemente.

El nemático tridimensional de las moléculas tipo disco no se recibió de repente en los laboratorios. Más a menudo surgían redes de hilos líquidos. Además, se aclaraba que esta red no era obligatoriamente hexagonal. Suelen existir también redes cuadradas. Sin duda alguna la aparición de una u otra red no depende sólo de cómo están colocados los tubos rígidos, sino que se determina por otros detalles de la estructura de las moléculas planas. Es que la molécula no tiene seguramente la forma de un disco regular. Pues estas irregularidades, aunque son pequeñas, dan a las fuerzas de interacción de las moléculas en el plano xy una dependencia angular pequeña que permite a la red elegir entre una u otra simetría. Esto coincide completamente con lo que pasa en el cristal sólido habitual.

No vamos a entrar en detalles de la estructura de las

moléculas-discos, pero queremos subrayar una singularidad. Semejantes moléculas por regla general poseen muchos átomos de carbono. Por ejemplo, en las cimas de los hexágonos, que están ajustados muy bien uno a otro en la fig. 9, *b*, se encuentran los átomos de C. Por eso estas sustancias se llaman con frecuencia carbonosas. A propósito, tales son el diamante extraduro y el grafito poco duro. Todos saben qué significa en nuestro tiempo el grafito. La estructura de su red en tres dimensiones es bastante simple: puede decirse que esta red es una pila de discos muy grandes con el tamaño de un cristal entero, desplazados uno con relación a otro. La distancia entre los discos infinitos (0,335 nm) es notoriamente mayor que la distancia entre los átomos en el hexágono (0,142 nm), lo que facilita la partición del grafito por los planos de los discos (fig. 101).

Examinemos ahora de qué manera se manifiestan las propiedades elásticas de la red de los hilos líquidos. Ya sabemos que el eje óptico del cristal, formado por las columnas nemáticas, es paralelo a los hilos líquidos: por esa dirección se orientan los ejes cortos de todas las moléculas. Al mismo tiempo este cristal puede representarse como un sistema de tubos rígidos colocados estrechamente. ¿En qué se distinguen las propiedades elásticas de este cristal de las propiedades del nemático en el que el eje óptico también está orientado igualmente en cualquier sitio, si no accionan las cargas?

La diferencia consiste en que aquí son posibles no todas las desviaciones del eje óptico L de la dirección única las cuales habíamos observado en diferentes partes del nemático con distintas cargas. El caso es que ahora el eje óptico está ligado rígidamente con la red cristalina real, aunque existe ella sólo en dos dimensiones. En realidad el vector L coincide, según la dirección, con los ejes de los tubos rígi-

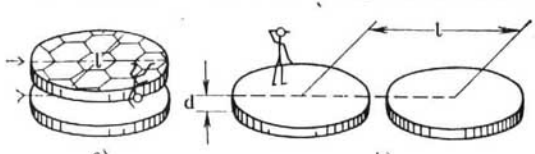


FIG. 100. *Las moléculas-discos de una columna (a) se atraen fuertemente, y de las columnas distintas (b) se repelen intensamente, siendo la distancia entre los centros de las masas la misma.*

dos. Por eso aquí es inadmisible la torsión del eje óptico en la orientación twist y su curvatura, mostrada en la fig. 39 (a la izquierda). En efecto, estas deformaciones significarían que los tubos rígidos en algunas partes del cristal tendrían que penetrar profundamente uno en otro lo que es imposible por causa de la repulsión fuerte de las moléculas. Para deformar así los tubos, se necesitaría hacer grandes esfuerzos, con los cuales la misma existencia de la red se haría imposible. De este modo, para el eje óptico de la red de los hilos líquidos existe sólo una posibilidad de curvarse así, como está mostrado en la fig. 39 (a la derecha). Esta curvatura se parece a la de un manojo gordo de tubos rígidos, muy bien ajustados uno a otro (fig. 102). En cualquier sección transversal del manojo los tubos son paralelos mutuamente, pero de sección a sección el eje del manojo cambia su orientación. Estas posibilidades limitadas en variar las propiedades ópticas confirman que observamos precisamente este cristal líquido, parcialmente sólido.

Si lo derretimos en nemático-disco nos convenceremos de que en este nemático existen la torsión y dos tipos de curvatura del eje óptico. Como ya se habló, sobre esto testimonian los defectos de orientación observados. El estado nemático de las sustancias carbonosas nos da posibilidades únicas para observar los defectos.

La causa consiste en que el nemático-disco posee una viscosidad muy grande, por eso los defectos en él no desaparecen fácilmente si ya habían surgido. Más aún se puede de súbito y con rapidez enfriar semejante nemático y todos los defectos de orientación en él, como si se "congelen", no teniendo tiempo para desaparecer. Recibiendo este material en manos, podemos observarlo despacio bajo el microscopio. En este caso el sector defectuoso se corta, quitando una capa

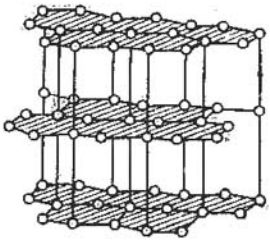


FIG. 101. *La red cristalina de grafito es una columna laminosa de grandes moléculas-discos carbonosas.*

fina tras otra bajo distintos ángulos respecto a la línea del defecto y a diferentes distancias de la última. Así se estudian hasta los más pequeños detalles los defectos de los nemáticos-discos.

Estos defectos despiertan verdadero interés porque al fin de cuentas ellos dejan huellas muy serias en la calidad del coque y grafito que se forman de los nemáticos-discos. Tenemos que decir que el estado nemático de estas sustancias empieza con unas esferas pequeñitas o, más precisamente, bolitas, en las cuales los ejes ópticos pueden mostrarse por líneas ecuatorial y latitudinal (fig. 103). Estas bolitas crecen gradualmente y se pegan en unas gotas grandes del nemático, como está mostrado en la figura. De resultas en semejantes gotas se concentran defectos muy parecidos a los que están mostrados en la fig. 34. Un problema tecnológico complicado consiste en recibir los nemáticos-discos con la orientación ideal del eje óptico, es decir, sin ningún defecto.

§ 3. EL MEJOR COQUE Y LA FIBRA ULTRARRESISTENTE

Vaya, dirá el lector escéptico, qué tendrá que ver el coque con los cristales líquidos. En efecto, nadie había sospechado esto durante muchos años. Y sólo después de que los químicos recibieron las moléculas-discos puras se aclaró de repente que semejantes sustancias existen alrededor de nosotros en grandes cantidades —literalmente en millones de toneladas— y la importancia tecnológica del estado de cristal líquido es muy difícil de sobrevalorar.

El coque es carbón puro que se obtiene de los mejores tipos de carbón y petróleo, al calentarlos hasta 400-600 °C en una atmósfera sin oxígeno. Al fundir el arrabio o el acero, el coque arde a cuenta del oxígeno, que está en el mineral de hierro. De este modo él es no tanto un combustible, como un reagente químico que reduce los óxidos del hierro. Del régimen de la fusión y de la calidad del coque

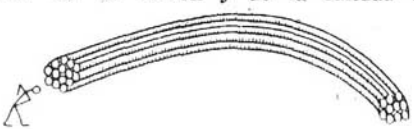


FIG. 102. *Curvatura del cristal líquido de columnas.*

dependen el contenido porcentual del carbono en el acero, sus propiedades mecánicas y químicas. La calidad del coque como reagente químico depende, primero, de la cantidad de impurezas en el coque, y segundo, de su estructura cristalina.

Pues aquí hemos llegado a lo más principal. Resulta que en el proceso de coquización los alquitranes de petróleo pueden estar en estado de cristal líquido. Esto tiene lugar a causa de que las moléculas orgánicas complejas del petróleo tienen la forma de discos planos que se apilan en columnas. Si se lleva a cabo la coquización a temperaturas de existencia de estas columnas, el coque sólido obtenido tiene también la estructura ordenada y su calidad es más alta que en otros regímenes de coquefacción. Aplicando al máximo este coque se obtiene un gran ahorro del combustible.

La tecnología para recibir fibras artificiales puede servir de un ejemplo más cuando se utiliza el estado de cristal líquido. Cada uno quien vio como colocan el asfalto, seguramente, se fijó con qué facilidad se estiran los hilos largos y elásticos del alquitrán líquido. Ahora imaginémonos que de algún depósito con el alquitrán caliente por aberturas extraordinariamente pequeñas se exprimen hilos finos líquidos (fig. 104). Al enfriarse, se forman fibras sólidas carbonosas. Y hace poco que se supo que la solidez de estas fibras puede ser extraordinariamente alta (como de un alambre de acero) si fuesen exprimidas del alquitrán en estado de cristal líquido. Lo mismo que en el caso del coque, el mejoramiento de la calidad de las fibras se explica por la ausencia de defectos en su estructura.

Ya que hablamos de las fibras, es necesario decir algunas palabras sobre una posibilidad más, que ofrecen los cristales líquidos para los tecnólogos. Las más resistentes fibras sintéticas poliamídicas que se utilizan en calidad de armadura (tejidos *cord*) para los neumáticos de automóviles y

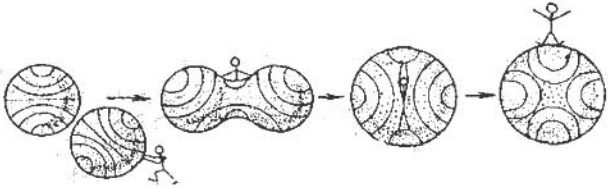


FIG. 103. *Defectos en las gotas crecientes del nemático-disco.*

otros artículos, se estiran de soluciones de cristal líquido. Esto se hace así. El polímero cuya molécula tiene forma de un hilo largo rígido o de cadena, se disuelve en un solvente especial. Siendo la concentración del polímero determinada, a sus moléculas les es más ventajoso disponerse paralelamente unas a otras (sobre esto se había hablado en el cap. I), formando el estado nemático. La fibra se estira de esta solución por unos agujeros muy pequeños y después de esto se somete a secado rápido para eliminar el solvente. La resistencia de esta fibra a la rotura es decenas de veces más que la de las fibras estiradas de una solución ordinaria no de cristal líquido, y es un poco inferior a la resistencia del alambre de acero (es innecesario, por lo visto, recordar que las fibras orgánicas son mucho más ligeras que las de acero y no se cubren de herrumbre).

Hace falta decir que la utilización del estado de cristal líquido en los procesos tecnológicos es una cosa completamente nueva. Las grandes posibilidades se abren, por ejemplo, también en la tecnología química: la salida de los productos finales de la reacción puede ser esencialmente aumentada, si se lleva a cabo el proceso en solventes de cristal líquido, que orientan (recordemos los "huéspedes" en casa ajena) las moléculas de sustancias reaccionantes.

§ 4. EL CRISTAL QUE ES SÓLIDO SÓLO EN UNA DIRECCIÓN

¿Quién no hizo pompas de jabón? Esto realmente es un pasatiempo atractivo y muy útil desde el punto de vista científico, ya que tiene relación directa con los cristales líquidos, sobre los cuales ahora les contaremos. Trataremos sobre los cristales líquidos esmécticos o, hablando brevemente, sobre los esmécticos. „*Smegma*" traducida del griego significa 'jabón". Ya hace mucho tiempo descubrieron que hay un tipo de cristales líquidos, que por su estructura se parecen a las películas

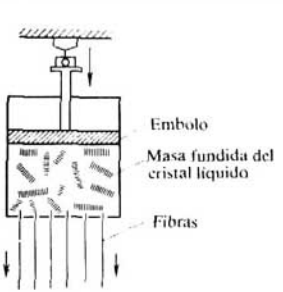


FIG. 104. *Al exprimir el cristal líquido formado por las moléculas-discos, se recibe una fibra superresistente.*

de jabón. ¿Qué estructura tiene la película líquida de jabón que sirve de superficie para la pompa? No es tan simple como parece. Esto es un sistema bastante complejo compuesto de moléculas de agua y moléculas mostradas en la fig. 38, *a*.

La película tiene esta estructura: la capa intermedia fina de las moléculas de agua está rodeada por dos partes, por moléculas dipolares. Las cabecitas dipolares están vueltas hacia el agua y las colas largas están saliendo hacia afuera (fig. 105). Por qué sucede eso, estará claro del capítulo siguiente. La superficie de la película de jabón es absolutamente neutral, pues las colas no tienen ningunas cargas eléctricas. Esta película no se pega a nada y el agua colocada en una envoltura hecha de ella, se evapora muy despacio, lo que aumenta la vida de las pompas de jabón. Además, la película de jabón, como cualquier película líquida, posee una tensión superficial, que le da resistencia y elasticidad. Por eso las pompas de jabón no se destruyen, si las rozamos suavemente, sino que botan como bolitas elásticas, y se conservan relativamente mucho tiempo.

Pero la película de jabón posee una propiedad interesante más. Compárense las figuras 105, *a* y 38, *b*. Se ve que en las dos figuras las moléculas alargadas están orientadas con sus ejes largos perpendicularmente a la superficie de la película. Por lo tanto, las moléculas de la capa en la fig. 105 poseen también un orden en la orientación. La diferencia está sólo en que el orden nemático existe en la película gruesa del líquido mientras que la película del jabón indi-

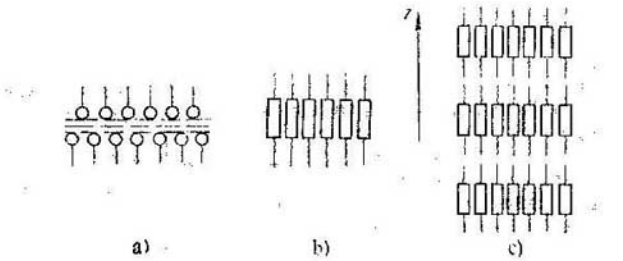


FIG. 105. *La película fina de jabón ordinaria (a) y la capa del cristal líquido de esméctico (b) se parecen mucho por su estructura; (c) la estructura de capas del esméctico.*

vidual tiene un espesor que es igual a la suma de las longitudes de varias moléculas. Así, tenemos el caso de la capa fina, en la cual prácticamente todas las moléculas están orientadas de igual modo (perpendicularmente a la superficie), se transladan libremente a lo largo de la superficie, pero de una manera que los centros de las masas de las moléculas estén en el mismo plano. Este plano se llama *esméctico*. El plano esméctico es paralelo naturalmente a la superficie de esta capa fina.

Se puede hacer también una película gruesa de jabón que será una pila de capas finas paralelas entre sí (véase la fig. 129 en el capítulo siguiente). Pero se puede obrar de otro modo. En vez de la mezcla de agua y jabón, se puede utilizar las moléculas de una clase que tiene la parte central alargada rígida y dos colas elásticas (fig. 105, *b*). El esqueleto rígido sustituirá las cabecitas dipolares de las moléculas "de jabón", divididas por una capa de agua, y ahora recibiremos una pila de capas que pueden deslizarse una respecto a otra utilizando las colas elásticas como cierto "lubricante" (fig. 105, *c*) con la particularidad de que el espesor de cada capa es igual a la longitud de una molécula. En todas las capas las moléculas están orientadas igualmente y son paralelas al eje *z*. En cada capa individual las moléculas se mueven sin obstáculos a lo largo del plano, bajo la acción de choques térmicos. Pero todas las capas en la pila están a una distancia bien determinada una de otra. Esta distancia es la misma para cualesquiera planos vecinos y aproximadamente es igual a la longitud de la molécula.

Realmente ahora mismo, incluso inesperadamente para nosotros mismos, hemos descrito una nueva estructura de la red cristalina. Esta red es periódica sólo en una dirección, o sea, a lo largo del eje *z*. El período de la red es aproximadamente igual a la longitud de una molécula. En este cristal líquido, como también en el nemático hay un eje óptico que no cambia su orientación en ninguna parte del cuerpo si no accionan las cargas. A lo largo de los planos este cristal líquido se porta como un líquido habitual. Pero a lo largo del eje único cristalino este cristal líquido demuestra las propiedades del sólido, es decir, posee una elasticidad. Si por ejemplo tiramos de dos superficies de esta película gruesa en direcciones contrarias a lo largo del eje *z*, la distancia entre los planos aumentará. Sin embargo, como en el cristal sólido, surgirán las fuerzas elásticas que tienden a disminuir el período de la red. Por eso después de

quitar los esfuerzos, la película volverá al estado inicial y el período de la red llegará a ser el mismo.

El cristal líquido, sólido sólo en una dimensión, se denomina *esméctico*. Los químicos obtuvieron muchos esmécticos que están compuestos de moléculas sólo de una clase, pero estas moléculas siempre se someten a dos exigencias, o sea, son largas y tienen "colas". En algunos casos estas moléculas poseen también dipolos constantes, pero no siempre. La condición de longitud grande para las moléculas del esméctico es bastante clara. Realmente para que se forme una capa fina plana de moléculas, que no saltan de la capa a temperatura moderada, hace falta mucha más adhesión entre las moléculas, que en el nemático. Claro está, a la misma distancia entre las moléculas paralelas, su adhesión es tanto más grande cuanto más largas sean. Por eso resulta así: las moléculas, no muy largas, prolongadas forman sólo el nemático y las más largas y más "rabudas" moléculas pueden formar tanto un nemático (a temperaturas más altas), como un esméctico (a temperaturas más bajas). Los dipolos constantes también ayudan a la adhesión más grande, merced a las fuerzas de atracción entre las cargas eléctricas contrarias.

De este modo en la mayoría de los esmécticos, de las propiedades de la película de jabón se queda sólo la propiedad de ser laminar y de la conducta líquida de algunas capas. Estos esmécticos se muestran habitualmente en forma de pila de capas planas dentro de las cuales las rayas verticales significan los ejes largos de las moléculas (fig. 106, *a*). Es muy importante que las rayitas sean perpendiculares a las placas esmécticas también cuando las capas se curven

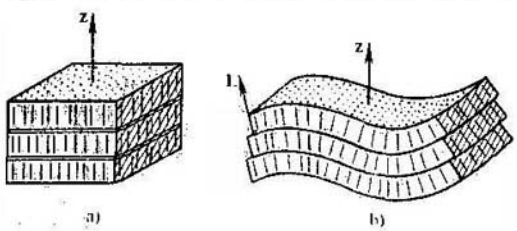


FIG. 106. *En el esméctico A los ejes largos de las moléculas siempre son perpendiculares a los planos esmécticos:*

a) las fuerzas exteriores están ausentes; *b*) la curvatura de las capas esmécticas bajo la acción de las fuerzas exteriores.

bajo la acción de cualesquiera fuerzas (fig. 106, *b*). Esto pasa por la misma causa de la adhesión más fuerte de las moléculas (en comparación con el nemático). Por lo tanto, en cada parte del esméctico encorvado el eje óptico sin falta es perpendicular a la tangente a la superficie de la capa: el eje como si estuviese fijamente montado perpendicularmente a los planos esmécticos en cada sitio.

El enlace tan sólido del eje óptico con la estructura de la red cristalina es un obstáculo serio para dirigir la propagación de la luz a través del esméctico. Por ejemplo, para que tenga lugar el efecto de Frederiks en el esméctico se exigen campos eléctricos decenas y centenas de veces mayores que en el nemático. Esto no es de extrañar. Para hacer girar el eje óptico ahora es necesario encorvar fuertemente las capas esmécticas y eso requiere una superación de las fuerzas elásticas bastante grandes que son inherentes al cristal sólido, aunque no muy habitual. Por eso hasta ahora la influencia electromagnética sobre los esmécticos no se emplea tan a menudo, como en el caso de los nemáticos. Sin embargo, hay un modo relativamente simple de influencia mecánica sobre el esméctico que conduce a los resultados deseados.

Es absolutamente natural utilizar las propiedades mecánicas de la red cristalina en una dimensión. Esto se hace así. El esméctico se pone entre dos placas de vidrio, con la particularidad de que el eje óptico se orienta perpendicularmente a las placas (fig. 107, *a*). A éstas se aplican las fuerzas que las estiran en partes contrarias a lo largo del eje *z* (fig. 107, *b*). En este caso el alargamiento relativo

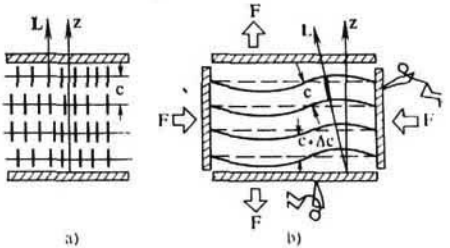


FIG. 107. *La deformación ondulada del esméctico A bajo la acción de las fuerzas mecánicas:*
a) la carga mecánica está ausente; *b*) la acción de las fuerzas mecánicas.

$\Delta c/c$ de la distancia entre los planos esmécticos aumenta proporcionalmente a las fuerzas de acción F. Surge una pregunta evidente: ¿Hasta qué momento continuará esta extensión de esmóctico?

Se puede decir ciertamente que la extensión regular del esmóctico no puede continuar infinitamente. El aumento ilimitado de la distancia entre los planos esmécticos vecinos acabaría en que, al fin y al cabo, las capas finas vecinas se apartarían unas de otras y entonces se desharía el esmóctico. Esto tendrá lugar en caso de un alargamiento muy grande, pero hasta este momento resulta que las capas pueden simplemente encorvarse como está mostrado en la figura. Realmente este encorvamiento de las capas, sin ruptura del cristal, es más ventajoso energéticamente. Es que al principio, cuando el alargamiento $\Delta c/c$ sobrepasa sólo un poco el umbral determinado, el encorvamiento es muy pequeño; además, en cada sección, la distancia entre los planos esmécticos prácticamente no cambia. Aumentan sólo los intervalos entre los puntos de intersección de las capas sesgadas con el eje z, como está mostrado en la figura. Pero esto es suficiente para asegurar el alargamiento común del esmóctico a lo largo del eje z.

Claro está que si en una parte del esmóctico se han deformado las capas finas hacia algún lado, en la parte vecina tiene que ocurrir la deformación igual por la magnitud, pero hacia el lado opuesto. Pues en caso contrario las capas tendrían que separarse una de otra y también de las placas de vidrio en esa u otra parte del esmóctico. Pero esto puede suceder sólo bajo la acción de los esfuerzos muy grandes. De este modo a lo largo de las placas de vidrio surge el encorvamiento periódico de los planos esmécticos (fig. 107, *b*). El espesor del esmóctico es, por lo común, de una décima del milímetro y el espesor de la capa fina aislada es cerca de una millonésima del milímetro. En estas condiciones el período del encorvamiento que surge tiene un valor intermedio: cerca de una milésima del milímetro.

Esta ondulación tan menuda puede observarse sólo mediante el microscopio. El semejante fenómeno a escalas más grandes no es difícil de ver en condiciones domésticas, si pegamos una pila de franjas elásticas de papel, digamos, con el engrudo y probamos estirarla antes que se seque el engrudo. En el esmóctico este mismo fenómeno tiene lugar también en caso de que la distancia entre las placas de vidrio se mantenga invariable y el esmóctico se apriete a

lo largo de los planos esmécticos, como ilustra la fig. 107, *b*. Un efecto parecido de encorvamiento de la estructura de capas al plegado se produce, desgraciadamente, en la vida cotidiana, por ejemplo, cuando chocan los automóviles. En realidad las partes delantera y trasera de la carrocería se construyen especialmente de manera que en situaciones críticas pudieran encorvarse en un plegado elástico, y de este modo proteger del golpe fuerte al salón de pasajeros.

En la práctica la compresión del esméctico transversalmente al eje óptico inicial se realiza calentando durante un tiempo relativamente largo el esméctico en cualquier sección (por ejemplo, mediante rayo láser) y en seguida enfriándolo fuertemente en esta parte (el rayo láser se desconecta instantáneamente). La sección, donde actuaba el rayo, se enfría rápidamente y por lo tanto se comprime a lo largo del plano esméctico lo que conduce a la aparición del "plegado" de los ejes ópticos. Este plegado actúa como una red de difracción, la cual, merced a la interferencia de los rayos que atraviesan la red en distintos sitios, amplifica el alumbrado de la pantalla en determinadas partes, pero debilita el alumbrado de las partes vecinas. Como resultado, la imagen óptica en la pantalla tiene el aspecto de una alternación periódica de franjas claras y oscuras.

La formación del "plegado" corresponde a un valor definido del alargamiento relativo del esméctico a lo largo del eje óptico o su compresión de modo transversal al eje. Para este valor llamado umbral, la pérdida de un tipo de energía se compensa por la ganancia de la energía de otro tipo. En este caso la pérdida está relacionada con la orientación desigual de los ejes ópticos en diferentes partes que, como sabemos, es desventajoso energéticamente. La ganancia está relacionada con que la energía elástica de la red en una dimensión es notoriamente inferior, si los planos esmécticos están sesgados de modo como se muestra en la fig. 107, *b*. Pues en este caso, la distancia entre los planos es bastante inferior que en caso cuando los planos son paralelos a la superficie de los vidrios. Precisamente éste es el origen del fenómeno. Por eso el balance de estas variaciones de la energía determina el valor de umbral del alargamiento relativo $\frac{\Delta c}{c}$ el cual habitualmente se encuentra en el intervalo de 10^{-5} a 10^{-4}.

De este modo, estirando el esméctico en una milésima

de su espesor, obtenemos un encorvamiento ondulatorio de los planos esmécticos. Si sobrepasamos este umbral considerablemente, el "plegado" semejante ya no será capaz de proteger el esméctico contra la ruptura y, al desgarse los planos esmécticos, las distancias entre ellos aumentan intensamente. Como resultado, ocurrirá una ruptura del esméctico, y, con más precisión, la separación de los planos vecinos uno de otro. Al vacío que se forma, afluirán las moléculas de las partes vecinas y formarán otra capa fina esméctica (complementaria) la cual como si se intercalase entre las capas de las existentes (fig. 108). El aumento posterior de las fuerzas aplicadas F conduce al surgimiento de cada vez nuevos planos esmécticos con los cuales inevitablemente está relacionada la aparición de una gran cantidad de defectos de la red cristalina.

El defecto de la red en este caso es el lugar, en el que sucede la construcción del plano esméctico complementario en la red anterior. En la fig. 108, estos lugares del esméctico están rodeados de rayas punteadas. Estos defectos recuerdan los defectos en el nemático sobre los que ya hemos hablado. En la figura el defecto está mostrado como un punto. En esencia, el punto es el centro del defecto. En el volumen del esméctico el punto se sustituye por una línea que es perpendicular en este caso al plano de la figura. Como también en el nemático, el rodeo alrededor del centro del defecto por el sendero circular nos llevará al mismo sitio, pero resultará que por diferentes lados del eje del cristal, que atraviesa el centro, el número de planos se distingue precisamente en uno. Así es la propiedad común de semejantes defectos en todos los cristales sólidos.

Los defectos del esméctico son notables por el hecho de

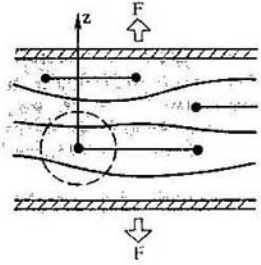


FIG. 108. *Al estirar el esméctico A a lo largo del eje cristalino, en éste se forman defectos.*

que refuerzan la red cristalina "estropeada", es decir, impiden que el cristal líquido vuelva al estado anterior ideal (sin defectos). Los defectos se entrelazan tan fuertemente y se enrollan entre sí, que sin un tratamiento especial del esméctico, es imposible desanudar este pelotón. En este caso dicen que el "plegado" de los ejes ópticos "se recuerda" por el cristal líquido. Esta "memoria" óptica puede ser muy larga y medirse con años. El "borrar" estos defectos de la "cara" del esméctico se puede, por ejemplo, calentando la sustancia tan intensamente para que ella se convierta en nemático y después enfriarla de nuevo, transformándola en esméctico. Un campo eléctrico intenso puede ayudarnos en este caso. Precisamente estas propiedades de los esmécticos les garantizan su utilización en la técnica, de lo que les contaremos en adelante.

§ 5. ESMÉCTICOS ... ¿CUÁNTOS SON?

Hay muchos esmécticos. Con más precisión, hay muchos tipos diferentes del estado esméctico. Ahora mismo acabamos de analizar el más simple de ellos, es decir, el llamado esméctico tipo *A*. La letra *A* en este caso significa sólo la primera letra del alfabeto latino. Queda por decir que también existen esmécticos *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H*, etc. El orden alfabético en la designación de nuevos tipos de estado esméctico en total refleja la complejidad creciente de la estructura de los cristales líquidos, los cuales no muestran la solidez en todas las dimensiones. Es fácil comprender que las combinaciones de las redes cristalinas de distinto tipo con orientaciones diferentes de las moléculas en estas redes, son muy numerosas. Realmente, descubrieron cerca de una decena de estas combinaciones. Estudiaremos algunas de ellas.

Al enfriarse algunas sustancias, el esméctico *A* se transforma en el *B*. Según el aspecto exterior, el esméctico *B* nos recuerda la miel y posee aproximadamente la misma viscosidad. Bajo el microscopio este cristal líquido tiene un aspecto de panel mosaico en colores. Mediante la difracción de los rayos X se deduce que en el plano esméctico de este cristal las moléculas están instaladas en orden regular por lo menos en pequeñas partes. Habitualmente en esta minired plana los centros de las masas de las moléculas están situados en las cimas de los hexágonos regulares (fig. 109). Hasta ahora no queda claro si se extiende en cada plano

esméctico la red hexagonal regular hasta la infinidad o, a pesar de todo, el tamaño de la parte "regular" está limitado. Resulta que esto es una cuestión científica difícil y muy principal. La contestación a ésta se podrá recibir sólo después de aclarar todos los detalles de interacción de las moléculas dentro del plano y en los planos vecinos.

Es que los físicos demostraron un teorema interesante que dice que la red cristalina regular infinita en un plano esméctico individual es en principio imposible. Esto está relacionado con que la desviación casual de las moléculas de los estados de equilibrio a causa de los golpes térmicos son muy grandes y frecuentes en un plano semejante. Por muy fútil que sean estos golpes, ellos, no obstante, impiden a los hexágonos ajustarse idealmente en un área grande. Si nos alejamos, por el plano, del hexágono prefijado cada vez más lejos, las pequeñas desviaciones de la idealidad se acumulan paulatinamente de modo que, al fin y al cabo, notamos la ausencia del orden verdadero (fig. 110). Es verdad que esto no significa aún que semejante red con defectos no sea sólida. El vidrio, por ejemplo, no posee una red regular, pero es sólido.

Para retener las moléculas en los lugares determinados en la red ideal sobre el plano esméctico se requiere el apoyo por parte de los vecinos de los planos cercanos, es decir, debe haber una pila de capas finas. Los planos vecinos con respecto al plano prefijado, juegan un doble papel. Por una parte, ellos repulsan fuertemente las moléculas de este plano que podrían ser expulsadas del plano por choques térmicos. Esta intensa interacción de las moléculas que se realiza a una distancia, igual a su longitud, asegura la existencia de la red en una dimensión también en el esméctico *A*. Por otra parte, las moléculas de los planos vecinos atraen, aunque débilmente, las moléculas del plano escogido

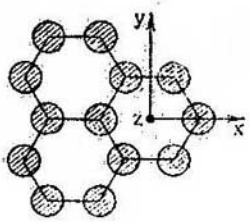


FIG. 109. *El esméctico B: la red regular en la parte pequeña del plano esméctico.*

Esta atracción es más débil que la atracción entre las moléculas de un plano, porque en el plano las moléculas pueden acercarse mutuamente a una distancia mucho menor. Sin embargo, la débil atracción entre los planos vecinos influye decisivamente sobre la estabilidad de la red en el plano prefijado, y, por lo tanto, en todo el esméctico *B* en total. En efecto, si por cualquier causa el hexágono escogido se desplaza de la posición regular, debe arrastrar tras sí, merced a la atracción, una cadena completa de semejantes hexágonos de toda la pila de planos. Pero aquí los golpes térmicos no podrán con el conjunto completo de moléculas, el cual hará volver a las moléculas desviadas a la posición de equilibrio.

Así, pues, habiendo, por lo menos, una interacción débil entre los planos esmécticos que aseguran la atracción de las moléculas, en el volumen del esméctico *B* tiene que existir una red cristalina en tres dimensiones, mientras que el esméctico *A* posee una red unidimensional. Se pregunta entonces ¿en qué se distingue el esméctico *B* del cristal habitual tridimensional? En principio, en nada. Pero a causa de la interacción débil de las redes situadas en los planos vecinos, el esméctico *B* se distingue por una gran disposición respecto al desplazamiento de estos planos en direcciones *x* e *y*. De semejantes cristales se dice que son *plásticos*. Las propiedades parecidas las posee, por ejemplo, el grafito (fig. 101): al presionar el lápiz contra el papel, del pizarrín se desliza al papel, capa por capa, el grafito. Los cristales plásticos son muy necesarios en muchas ramas de la ciencia y técnica.

Puesto que tocamos el problema principal sobre la esta-

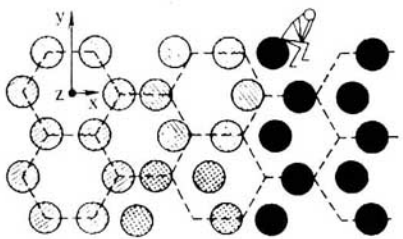


FIG. 110. *En una parte grande del plano esméctico en el esméctico B aparece la irregularidad de la red.*

bilidad de las redes cristalinas de diferentes tipos, al lector curioso le será interesante saber que también es inestable el cristal infinito, sólido sólo en una dirección. Recordemos otra vez que la red cristalina es inestable en una capa fina ilimitada, mientras que la red de hilos líquidos infinitos es estable. Pues, la pila infinitamente alta de planos esmécticos es inestable en absoluto a causa de la acción de quebrantamiento de los choques térmicos. ¿Por qué entonces hemos hablado sobre el esméctico *A*? Porque utilizamos en realidad siempre una pila no muy alta de planos, o sea, de una altura de hasta 0,1 mm. A un espesor semejante, el quebrantamiento térmico no puede "derrubiar" el cristal, sólido sólo en una dirección. Lo mismo se puede decir sobre la red en una capa fina de pequeña área. Por eso esta galleta fina del esméctico *B* de un diámetro pequeño puede tener una red cristalina.

El esméctico *C*, lo mismo que el esméctico *A*, posee una red cristalina en una dimensión. Pero a diferencia del esméctico *A* aquí, en cada plano esméctico, los ejes largos de las moléculas están inclinados con relación al eje cristalino *z* en un ángulo θ (fig. 111). Es evidente que este cristal líquido es menos simétrico. Si, por ejemplo, observamos la pila de planos del esméctico *A* bajo un ángulo recto al eje *z*, entonces desde cualquier dirección en el plano *xy* que miremos, esta pila tendrá para nosotros el aspecto completamente igual. Por eso la consideramos muy simétrica. Sin embargo, observando así mismo el esméctico *C*, notamos que la pila de planos aquí desde distintas direcciones se ve de modos distintos: las moléculas tendrán diferentes aspectos.

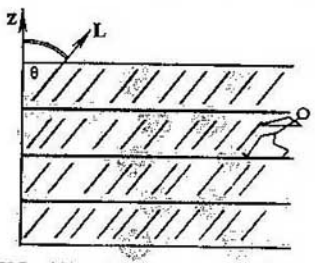


FIG. 111. *El esméctico C: la inclinación de las moléculas en las capas nemáticas finas.*

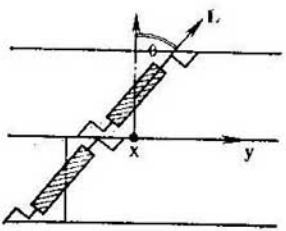


FIG. 112. *En el esméctico C las colas de las moléculas en zigzag en las capas se emplaquetan de manera concordada.*

Por eso decimos que el esméctico C es menos simétrico.

De esta manera, en el esméctico C el eje óptico L no coincide con el eje de la red z. Se puede incluso decir que en el esméctico no hay un eje óptico, sino muchos. Esto complica los fenómenos ópticos en estos cristales líquidos. Es interesante ¿de qué tipo de moléculas tiene que ser la sustancia para que ella pudiera encontrarse no sólo en el estado A a temperatura alta, sino también en el estado C a temperatura baja? Simplemente para ello no sirven barras largas: no hay motivos por que ellas deberían inclinarse. Y las rayitas en la fig. 111 muestran sólo la forma alargada de las moléculas. Los detalles oportunos en una estructura más compleja de la molécula pueden servir las colitas elásticas en los extremos de la barra rígida (fig. 112), lo que le da un aspecto en zigzag. Esa molécula se parece a la letra S alargada. Las colitas elásticas cortas en ella son paralelas, aproximadamente, al plano esméctico y el cuerpo rígido *siempre está inclinado al plano.*

Las moléculas de esta forma tan simpática existen realmente. A temperatura alta, los choques térmicos no permiten a estos "zigzag" ocupar una posición constante en el plano esméctico: el plano de cada "zigzag", en instantes mínimos, gira alrededor del eje cristalino z. Por eso, en término medio, durante el tiempo real de observación veremos sólo la proyección del "zigzag" sobre el eje z y para el observador este cristal líquido será el esméctico A. A temperatura baja y siendo el quebrantamiento térmico débil, a todos los "zigzag" les es energéticamente ventajoso ser paralelos uno a otro, como en el nemático, como si estuviesen helados en una posición determinada. Y el observador en seguida descubrirá que todas las moléculas, con más precisión, sus esqueletos duros, están inclinadas bajo el mismo ángulo θ al eje z y componen y ángulo $90° - \theta$ con el plano esméctico. Por lo tanto hemos recibido el esméctico C.

Si el cristal líquido posee, además del orden esméctico (de capas), una red cristalina en dos dimensiones en el plano esméctico, como el esméctico B y también la inclinación del "zigzag" en el plano, como el esméctico C, entonces se denominará esméctico G (fig. 113). Si cada capa fina del esméctico C es líquida en el plano esméctico, sobre el esméctico G esto no se puede decir: sus moléculas que quedan *en sus sitios regulares se parecen a varales de la empalizada* torcida.

El esméctico F es muy parecido al esméctico C, pero es

más viscoso a lo largo de los planos esmécticos. Las moléculas torcidas se reúnen aquí, por lo visto, en unos grupos más o menos densos, los cuales también pueden "nadar" a lo largo de los planos, pero no con tanta facilidad como lo hacen las moléculas aisladas en el esméctico *C*. Se puede decir que en el esméctico *F* hay algo del estado esméctico *G* cuya "empalizada" está destrozada en más o menos grandes partes.

Hasta ahora hemos hablado sobre las orientaciones de los ejes largos de las moléculas. Alrededor de estos ejes las moléculas, como regla, dan vueltas libremente por instantes cortísimos así que al observador le parece que las moléculas son redondas en secciones transversales. En realidad no son así, más bien se parecen a la tabla de la estacada, es decir, son alargadas y aplanadas (fig. 114, *a*). Repetimos que en la mayoría de los cristales líquidos esta circunstancia no es absolutamente esencial por los choques térmicos. Y sólo en algunos esmécticos a temperatura baja el quebrantamiento térmico no tiene fuerzas perturbar el orden en la orientación de ejes cortos. El esméctico *E* es precisamente este cristal líquido. En la fig. 114, *b*, que muestra la vista desde arriba sobre el plano esméctico de este cristal, están mostradas las orientaciones de la sección transversal de las "tablas". Los centros de las masas de las moléculas están sobre el plano del mismo modo que en el esméctico *B*.

Por último, el menos simétrico de todos los esmécticos conocidos, es el cristal líquido de tipo *H*. Su estructura en el plano esméctico se puede representar así: "tumbamos la

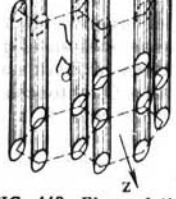


FIG. 113. *El esméctico G posee propiedades de los esmécticos B y C.*

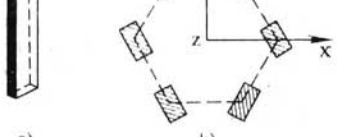


FIG. 114. *El esméctico E:* molécula espiral con el dipolo constante.

empalizada" del esméctico *E* a un lado, por ejemplo, en dirección del eje *x*. Entonces recibiremos un cuadro mostrado en la fig. 115, si se mira al esméctico *H* de perfil. En esta construcción es difícil buscar la simetría.

Los ejemplos citados con evidencia muestran cuánto es multifacético el mundo de los cristales líquidos, que no se agota por los tipos nombrados del estado de cristal líquido. A propósito, algunas sustancias en el intervalo de las temperaturas de varias decenas de grados pueden hallarse en todos estos estados que sustituyen por turno unos a otros. Esta diversidad de estructuras de cristales líquidos es particularmente esencial en las células de los organismos vivos donde ese u otro tipo de estado líquido o parcialmente sólido determina toda la actividad vital del organismo.

§ 6. ANTÍPODAS ÓPTICAS EN LOS ESMÉCTICOS

Hasta ahora en el relato sobre los esmécticos hemos sobreentendido que sus moléculas poseen simetría por reflexión, es decir, si se les da vueltas delante del espejo, sin falta habrá una posición de la molécula cuando ella coincida exactamente con su imagen en el espejo. ¿Y si no logramos a encontrar ninguna posición? En este caso, como ya sabemos, la molécula y su imagen en el espejo son antípodas ópticos. En el colestérico las moléculas derechas e izquierdas forman respectivamente espirales retorcidas a la derecha y a la izquierda de los ejes ópticos. En algunos esmécticos puede pasar algo parecido, pero es verdad que no en todos. Así, en el esméctico *A* donde los ejes largos de las moléculas son rígidamente perpendiculares a los planos esmécticos la influencia débil de los salientes y los vástagos del contorno molecular (fig. 74) no puede hacer nada con la estructura de este cristal líquido.

Otra cosa es el esméctico *C*. En tanto que a las moléculas les es igual, a qué parte con respecto

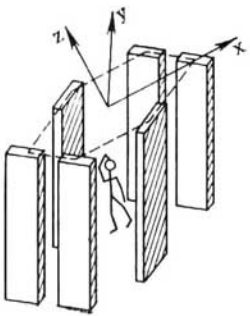


FIG. 115. *El esméctico H es el esméctico torcido E.*

al eje cristalino z inclinarse en un ángulo θ (fig. 111), las proyecciones de los ejes largos de las moléculas sobre el plano esméctico no están limitadas en sus giros alrededor de la dirección z. Las moléculas simétricas especulares en todas sus capas finas (nemáticas) del esméctico C escogen la misma dirección para sus proyecciones sobre el plano. Pero si el esméctico C está compuesto sólo de moléculas derechas o izquierdas (o hay más unas que otras), entonces, lo mismo que en el colestérico, las proyecciones de los ejes largos en los planos esmécticos resultan retorcidas en el espacio (fig. 116). El estado retorcido parecido adquieren también otros esmécticos con la „empalizada" inclinada de las moléculas, es decir, los esmécticos F, G, H.

Un interés especial lo representan los esmécticos C que contienen antípodas ópticos en distinta cantidad, cuyas moléculas poseen dipolos eléctricos constantes. Es necesario que estos dipolos estén instalados en los "esqueletos" de las moléculas transversalmente a los ejes largos (fig. 117). En esencia en la figura está mostrada la letra conocida alargada S, pero ahora sus colitas sobresalen un poco del sector plano principal, formando junto con él un pedazo de la espiral y, además, perpendicularmente al sector plano sobresale el dipolo. Ahora imaginémonos que en el esméctico C todas las moléculas están orientadas precisamente en esta posición. Con más precisión así se orientan las moléculas de zigzag en una capa fina concreta. En las capas finas vecinas las moléculas resultarán vueltas alrededor del eje del cristal en un ángulo pequeño α, como en el colestérico (fig. 116).

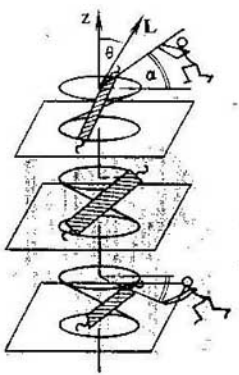


FIG. 116. *La espiral de orientación en el esméctico C.*

La invariabilidad de la posición de los "zigzag" en un plano esméctico concreto se explica con que a las moléculas de esta forma es muy difícil dar vueltas alrededor de sus ejes largos, si están inclinados. Realmente este giro inevitablemente conduce a que las colas de las moléculas tienen que entrar,

por lo menos temporalmente, en las capas finas vecinas. Pero sabemos que entre estas capas actúan fuerzas de repulsión potentes, que no permiten a las moléculas "ajenas" penetrar en la capa concreta. La imposibilidad de los giros de los sectores planos de los zigzag en el esméctico C conduce a una consecuencia importante: los vectores de los dipolos constantes deben orientarse en el plano esméctico completamente igual en todas las moléculas (fig. 118).

De este modo, llegamos a una conclusión notable: los topes opuestos de la capa fina en el esméctico C deben tener cargas contrarias si las moléculas tienen dipolos constantes, instalados perpendicularmente a las partes planas de los "zigzag". Entre otras cosas, esta estructura de las moléculas significa precisamente que las moléculas no son simétricas especulares. Refléjese la molécula de la figura 117 en el espejo, situado en su plano principal y en seguida se notará que las cargas positiva y negativa del dipolo se han cambiado de sitios, esto es precisamente el antípoda. Es interesante que los dipolos pueden no influir en absoluto sobre la existencia del esméctico C, pero si éste se ha formado, las flechas de estos dipolos trazadas de las cargas negativas a las positivas, se ponen estrictamente en una dirección.

En general este fenómeno de la misma orientación de los dipolos eléctricos en ausencia del campo eléctrico recibió el nombre de *"ferroelectricidad"* y por primera vez fue descubierto en los cristales sólidos de la llamada sal de la Rochele. Hasta hace poco tiempo se pensaba que la ferroelectricidad existe sólo en los cristales sólidos con una estructura especial de la red. El descubrimiento de este fenómeno en la capa líquida sorprendió a los científicos y despertó un interes práctico hacia semejantes esmécticos. La causa reside en que el cristal con los dipolos constantes, igualmente orientados, es fácil de dirigir con ayuda de un campo. En este caso el campo eléctrico no tiene que realizar ningún trabajo para separar las cargas en diferentes partes, pues los dipo-

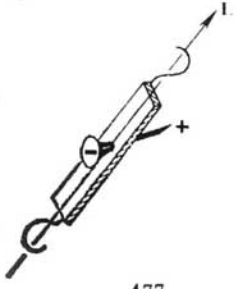


FIG. 117. *Así se puede imaginar la molécula espiral con el dipolo constante.*

los ya existen. Es verdad que de vez en cuando las moléculas del nemático también poseen dipolos constantes, pero su orientación en el nemático es completamente caótica, así que el campo eléctrico tiene que dar la vuelta a cada dipolo por separado. Todo esto exige campos eléctricos demasiado fuertes si la ferroelectricidad está ausente. El esméctico *C* atrae la atención precisamente por el hecho de que en cada capa fina de éste el campo puede hacer girar todos los dipolos a la vez, sin gastar la energía para su formación y puesta en orden. En tanto que los dipolos están enlazados rígidamente con los esqueletos de las moléculas, el giro unido de los dipolos lleva tras sí el giro no menos unido de los ejes largos de las moléculas. De esta manera, el campo eléctrico débil dirige relativamente fácil los ejes ópticos del esméctico *C*, si a este cristal líquido es inherente el fenómeno de ferroelectricidad. En ausencia del campo, los dipolos, como si fueran clavillos microscópicos, hincados en las "tablas" de las moléculas, giran junto con estas "tablas" alrededor del eje del cristal, al pasar de un plano esméctico al siguiente. Por lo tanto, a la par con la espiral de los ejes de las moléculas en el espacio existe también una espiral de los dipolos eléctricos (fig. 119, *a*). Sin duda alguna los pasos de ambas espirales coinciden. El campo eléctrico E paralelo al plano esméctico, "desenrolla" la espiral de los dipolos constantes, ya que sobre ellos en el campo actúa el momento de torsión (véase la fig. 42). El paso de la espiral se hace tanto más grande cuanto más fuerte es el campo. Por fin, para un valor determinado de umbral del campo, la espiral se desenrolla completamente (fig. 119, *b*).

El paso del esméctico enrollado *C* al estado desenrollado, merced a la interacción de los dipolos constantes con un campo eléctrico, origina un cambio esencial de las propieda-

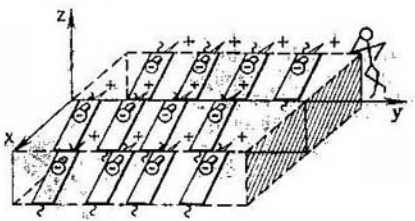


FIG. 118. *Las cargas eléctricas en los extremos de la capa fina del esméctico C.*

des ópticas del cristal líquido: desaparecen la reflexión selectiva de la luz, la rotación gigantesca de la polarización de la luz; los rayos atraviesan de otro modo el esméctico y se desvían por él. En comparación con los cristales sólidos, para esto se necesitan pequeños gastos de potencia. Por eso es atrayente el utilizar la ferroelectricidad en los cristales líquidos para dirigir con eficacia los rayos láser, como lo hacen los cristales sólidos especiales.

§ 7. ¡FUSIÓN DURANTE EL ENFRIAMIENTO!

Es del saber común: todas las sustancias se funden al calentarse y se endurecen al enfriarse. La confirmación contraria suena paradójicamente. Sin embargo, los cristales líquidos permiten hacer la excepción de la regla común. En concreto, se trata de la fusión del esméctico *A* pasando al nemático. La fusión de cualesquiera cristales significa la destrucción completa de la red cristalina. En dicho caso desaparece la posición periódica de los planos esmécticos paralelos, es decir, se destruye la red que existía en la dimensión única. Es interesante estudiar la fusión del esméctico *A* al disminuir la temperatura, no sólo desde el punto de vista de la ciencia sobre la estructura de los cristales, sino en el sentido práctico. Muy a menudo es necesario tener materiales que trabajen a bajas temperaturas tan bien, como a temperaturas altas. Esto se refiere, en particular, a los nemáticos los que, como ya sabemos, son materiales ópticos valiosos.

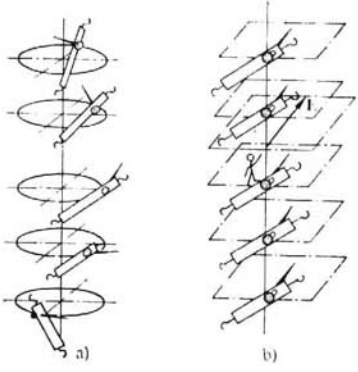


FIG. 119. *Desenrollo de la espiral de los dipolos en el esméctico C por el campo eléctrico:*
a) el campo está ausente; *b*) el campo sobrepasa el valor de umbral.

Es cierto que no cada esméctico puede poseer semejante propiedad. Son necesarios especiales tipos de moléculas y de la red. En calidad de modelo otra vez puede servirnos la película de jabón, mostrada en las figs. 105, *a* y 129. Sabemos que ésta no es una estructura simple. Si las colas de las moléculas con cabezas dipolares están organizadas de un modo peculiar, digamos, demasiado gruesas y encorvadas o, si a la par con estas moléculas hay también moléculas corrientes largas que son capaces de engancharse a las colas, la estructura de la pila de capas finas puede distinguirse de la mostrada en estas figuras. Lo más probable la pila será como en la fig. 120. Las colas se empaquetan en capas finas de modo que en cualesquiera capas vecinas las cabezas dipolares forman enteramente bien la superficie superior o bien la inferior. El espesor de tales capas separadas es igual aproximadamente a la longitud de una molécula.

En calidad de capa fina se podría escoger un par de capas vecinas que tienen cabezas que se rozan. El espesor de semejante capa es igual a la longitud doble de la molécula. En el centro de esta capa están en contacto dos superficies dipolares. El contacto puede realizarse a través de la capa intermedia de agua o sin ella. El agua nos será útil para comprender más claro la esencia del asunto. Por ejemplo, la cabeza dipolar, en calidad de carga positiva, puede tener el ion de sodio, el cual en el agua se separa fácilmente de la cabeza. Como resultado se forma una molécula con carga negativa. Esto significa que de hecho en el centro de la capa doble examinada están en contacto dos superficies con cargas negativas entre las cuales, evidentemente, surgen fuerzas de repulsión de Coulomb.

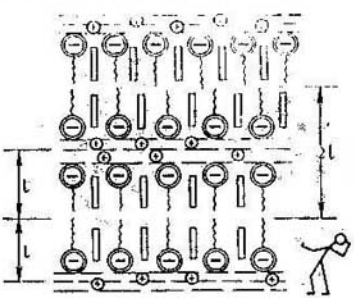


FIG. 120. *El modelo del esméctico A que tiene la periodicidad doble de la red en una dirección.*

Sin duda, el espesor de esta capa doble puede considerarse como el período de la red cristalina en una dimensión: poniendo estas capas en pila una encima de la otra, recibiremos precisamente el esméctico *A*. Y ¿qué hacer con las capas solitarias, cuyos centros de masa están prácticamente en el centro de la molécula? Es que la masa principal de las moléculas está concentrada en sus colas largas. Trazando a través de estos centros de masas los planos que se llaman esmécticos, obtendremos una red, pero su período será igual a la distancia entre estos planos, es decir, a la longitud de una molécula. De este modo la red cristalina, compuesta de las moléculas especiales, tiene dos períodos característicos: l y $2l$.

El lector, sin duda, captará la afectación de este sistema cristalino. Efectivamente para su encarnación en la vida hace falta bastantes esfuerzos. Pero la naturaleza es generosa y construye las más asombrosas moléculas y redes moleculares. La red dibujada no puede existir a temperatura demasiado alta, ya que su estructura contiene elementos, los cuales no es difícil quebrantar con los choques térmicos. Al calentar, la red puede fundirse convirtiéndose tanto en el nemático, como en el esméctico *A* que posee sólo un período de la red l. En realidad, precisamente este esméctico *A* se da en la fig. 105, *c*, su estructura es más simple que la del esméctico con capas dobles.

Pero nos interesa ahora el resultado del enfriamiento del esméctico con dobles capas finas y dos períodos característicos de la red. Por muy débil que sea la atracción entre las moléculas, al reducir la temperatura, la atracción "ajusta" cada vez más fuerte las moléculas unas a otras lo que conduce a la compresión de los cuerpos. Durante el enfriamiento también se comprime la red. Y aquí sucede un fenómeno interesante. Cuando en la capa doble dos capas unitarias, vueltas la una a la otra con las superficies cargadas, se atraen a una distancia muy cercana, entre las cargas negativas surge una repulsión muy fuerte. Esto significa que a temperatura baja, es imposible el contacto estrecho de dos superficies cargadas; las cargas de estas superficies están dispuestas a desplazarse a cualquier sitio, a fin de no estar juntos. Pero si se destruyen los planos cargados, es evidente, que se deshacen también los planos esmécticos que son paralelos a ellos. Por consiguiente se funde toda la red en total (fig. 121).

Así aparece la excepción de la regla común que dice:

la cristalización surge durante el enfriamiento. De todo lo dicho se pueden sacar algunas conclusiones interesantes más. Por ejemplo, si el esméctico *A* con capas dobles se somete, bajo temperatura constante, a una compresión fuerte, en fin de cuentas se fundirá en el nemático. Esto es un corolario directo de una repulsión fuerte que surge al disminuir el período de la red cristalina tan afectada. Los mismos efectos se observan en las mezclas de los esmécticos con capas solitarias y dobles, al variar la concentración de los componentes, que perturba el equilibrio de la red que no es muy estable.

Semejantes fenómenos retardan considerablemente la formación de un cristal verdaderamente sólido, al enfriarse la sustancia. Esto no es sorprendente, ya que la estructura de la capa doble contradice la estructura de la red que es sólida en todas las dimensiones. Por eso en el grupo de las moléculas es necesario en primer lugar destruir los grupos de tipo capas dobles, fundiéndolos en el nemático y después, construir de las moléculas aisladas una red completamente nueva. El retardo del proceso de cristalización tiene una relación directa con el sobreenfriamiento de la sustancia en el estado líquido en el cual se encuentran algunas concentraciones de las moléculas que no concuerdan con la estructura del cristal sólido. Aquí se presenta una analogía evidente. Todos saben, qué difícil y demasiado largo es apoderarse de la atención de un colectivo, sobre todo si está dividido en grupos que hablan con entusiasmo sobre algo interesante solo para ellos.

Así son las propiedades principales de los cristales líquidos esmécticos. Estudiándolos, no dejamos de admirar la belleza y la ingeniosidad de la naturaleza que crea esos conjuntos moleculares incomparables.

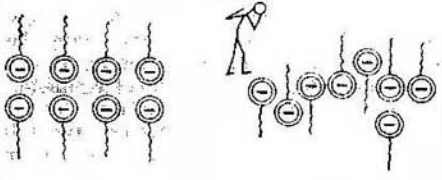


FIG. 121. *La fusión de la red de dos períodos al enfriarse:* *a)* la temperatura es más alta que la de la fusión; *b)* la temperatura es más baja que la de la fusión.

§ 8. EL LÁPIZ DE LÁSER Y EL "ROENTGEN" ULTRASONORO

Como se sabe, se puede dibujar con lápiz, tiza, pincelito, etc. y borrar lo dibujado respectivamente con goma, trapo o con algo más. Pero imaginémonos una computadora en función, que, digamos, elabora la información meteorológica. Qué bien sería, si como resultado fuese entregado un mapa detallado o cualquier esquema complicado. Pero una cosa tan simple como el dibujo al ordenador moderno le cuesta mucho trabajo. La máquina puede dibujar con ayuda del rayo electrónico en la pantalla del tubo de televisión, pero en este caso el cuadro tiene que reescribirse todo el tiempo, ya que las pantallas luminiscentes por ahora no poseen bastante memoria segura. Se puede dibujar también mediante una "mano mecánica" que sostiene un lápiz ordinario, pero este sistema resulta muy grande y lento. Además en este caso no se logra que la información se borre con bastante comodidad.

¿Podrá utilizarse el rayo láser en calidad de lápiz? ¡Claro que sí! El rayo láser puede desviarse no sólo mecánicamente, digamos, con ayuda del espejo oscilante, sino mediante otros procedimientos más rápidos. Por ejemplo, con ayuda de los cristales sólidos o líquidos, cuyos índices de refracción dependen de la tensión eléctrica, aplicada al cristal. Existen también dispositivos acústico-ópticos de gran velocidad. En ellos el rayo se desvía por el cristal a lo largo del cual corre una onda sonora. De esta manera queda claro cómo se puede manejar el lápiz láser; ahora es necesario sólo obligar al rayo que deje huellas.

Lo más simple es pasar el rayo por el papel fotográfico, pero entonces hace falta revelarlo. Se puede simplemente grabar al fuego la imagen, como lo hacíamos muchos de nosotros con ayuda de la lente y el reflejo de sol. Pero el grabar al fuego exige gran energía del rayo y nos da una imagen imborrable. Sin embargo, la misma idea de utilizar el efecto térmico del rayo láser resultó muy perspectiva.

Imaginémonos que logramos hallar un material que fuese prácticamente transparente al principio, se pusiese opaco en los lugares por los cuales haya pasado el rayo láser, guardase la huella del rayo, tanto tiempo como se quiera, y pudiera pasar al estado transparente inicial con ayuda de la tensión eléctrica. Entonces podríamos dibujar y borrar la imagen muchas veces y en caso necesario hacerlo muy rápi-

do y además, absolutamente "sin aplicar las manos". Resulta que este medio exótico existe: son los conocidos cristales líquidos esmécticos. (En las sustancias colestéricas también se puede realizar este proceso llamado *grabación termoóptica* de las imagenes, pero con características ópticas peores, en cierto grado.)

¿Cómo hacer técnicamente el dibujo con el lápiz láser? ¿Qué tomar en calidad de "papel"? La construcción de la instalación del cristal líquido correspondiente está mostrada en la fig. 122. Ella consiste en el láser, cuyo rayo se desvía por un sistema especial, una capa del cristal líquido que sirve de "papel" y un sistema de proyección que nos permite ver la imagen en la pantalla.

Lo mismo que antes la sustancia de cristal líquido se ubica en la holgura estrecha entre dos vidrios, a cuyas superficies interiores se les aplican electrodos transparentes. Estos electrodos son necesarios sólo para borrar la imagen mediante la tensión eléctrica. La grabación se realiza calentando la sustancia con el rayo láser. Para eso el rayo láser tiene que absorberse en el cristal líquido y al mismo tiempo, como ya se ha dicho, la sustancia debe ser transparente para otro haz luminoso, en el cual se examina la imagen. Estas dos exigencias aparentemente se contradicen, pero el problema se resuelve utilizando en calidad de impureza en el cristal líquido unos colorantes especiales que absorben sólo la luz láser (por ejemplo, roja o infrarroja) y no absorben la luz en la restante banda visible.

Para que la instalación trabaje, el cristal líquido tiene que poseer el estado esméctico, que siendo calentado pasa

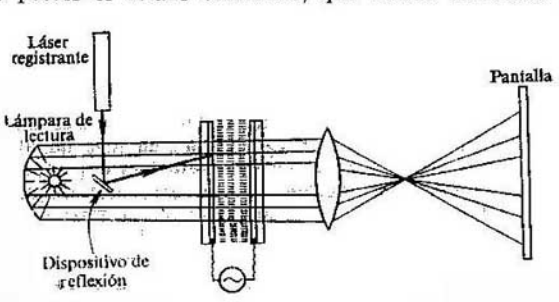


FIG. 122. *El láser graba la imagen en el esméctico.*

al estado nemático y después se convierte en un líquido habitual. Además, las moléculas tienen que poseer un dipolo grande dirigido a lo largo del eje molecular largo. Esto es necesario para borrar la imagen con ayuda de la transición de Frederiks ya conocida por nosotros.

Supongamos, por ejemplo, que tenemos el esméctico a temperatura ambiente, el cual pasa al nemático a 30 °C. Supongamos también que en estado inicial la sustancia está a temperatura cerca de 25 °C y sus moléculas están orientadas perpendicularmente a los vidrios (la orientación se prefija mediante la elaboración especial de los electrodos) (véase la fig. 123, *a*). Entonces, a pesar de la presencia del colorante, la capa del cristal líquido será prácticamente transparente. El calentamiento rápido de la sustancia con el rayo de registro (digamos, hasta 32°—35 °C) la convierte en el líquido habitual. Al retirarse el rayo la sustancia se enfría y vuelve a ser esméctico. El enfriamiento va muy rápido y las moléculas no tienen tiempo para ocupar sus posiciones iniciales y ponerse perpendicularmente a los vidrios. En estas partes (A y B en la fig. 123, *b*) la orientación inicial perfecta resulta perturbada, aparecen muchísimos defectos, el índice de refracción cambia su significación de punto a punto de un modo irregular y estos sectores dispersan fuertemente la luz, con la cual se lee la imagen. Esta orientación "defectuosa" puede conservarse mucho tiempo (horas, días o hasta meses). Recibimos de este modo una memoria duradera, a causa de que los cristales líquidos esmécticos por una dirección determinada son tan "testarudos", como las sustancias sólidas habituales, o sea, sin una fuerte acción exterior las capas moleculares no pueden trasladarse, ni aun

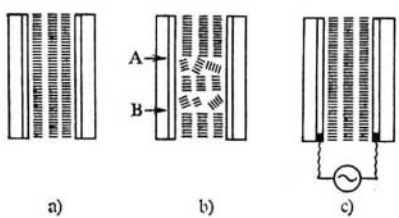


FIG. 123. *La orientación de las moléculas del esméctico antes de la grabación (a), después de la grabación (b) y después de la borradura (c).*

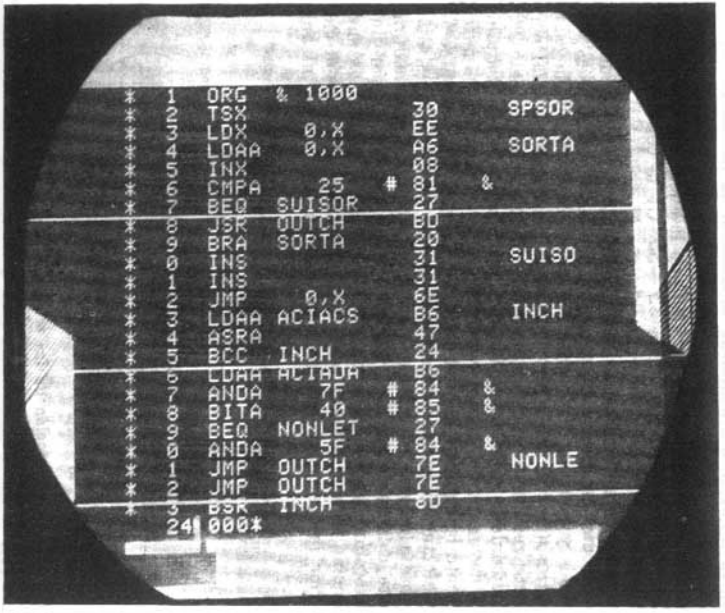


FIG. 124. *Texto escrito en el cristal liquido esméctico mediante el rayo láser.*

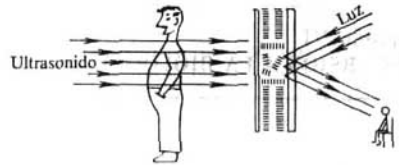


FIG. 125. *Principio de la acción del "roentgen" ultrasonoro.*

encorvase. Sólo una diferencia muy grande de los potenciales de los electrodos puede obligar a las moléculas enfilarse a lo largo del campo (recordemos su gran momento dipolar). Las capas moleculares se enderezan (fig. 123, *c*), y la sustancia se hace transparente. Se borra la imagen y la instalación está preparada para un nuevo ciclo de grabado.

Si el rayo láser es muy agudo y la capa del cristal líquido es bastante fina, con este procedimieto se puede escribir hasta textos (fig. 124). La cantidad de letras que caben en una "página" es aproximadamente de un millón.

La imagen, recibida de este modo, puede proyectarse en una pantalla grande. Esto es de mucha importancia, cuando el número de personas que observan al mismo tiempo la imagen es bastante grande. La pantalla puede ser tan grande como en el cine. El tubo de televisión con la pantalla de este tamaño sería difícil imaginarlo.

Los cristales esmécticos tienen aún otra aplicación más interesante. Su orientación puede variarse con la onda sonora o ultrasonora. A base de este principio ahora se intenta construir una "instalación de roentgen" ultrasonora para el diagnóstico médico. En este caso el cuerpo humano no sería atravesado por los rayos X rígidos sino por ondas ultrasonoras absolutamente inofensivas. La capa del cristal líquido de esta instalación recibe las ondas amortiguadas por el cuerpo del paciente (fig. 125) y la distribución de su intensidad se fija como una imagen con la orientación molecular perturbada del esméctico. El problema consiste en aumentar la sensibilidad del cristal líquido a las ondas ultrasonoras.

Capítulo VI
EXCURSIÓN A LA BIOLOGÍA

§ 1. RAZONAMIENTOS GENERALES

La ciencia sobre lo viviente, denominada biología, es muy compleja. En la biología es más fácil hacer cien preguntas que contestar por lo menos a una. Sin embargo, es necesario buscar las respuestas y por eso con frecuencia en estas búsquedas los biólogos recurren a la física.

El interés en los cristales líquidos por parte de los biólogos no es casual. Primero, precisamente los cristales líquidos combinan en sí la ordenación, característica de los sólidos, y la movilidad que es propiedad del líquido. Estas dos propiedades, aparentemente contrarias, son características para la materia viva en todas sus manifestaciones. Por ello resulta muy atrayente aplicar la teoría, estudiada bastante detalladamente para los cristales líquidos, a estos fenómenos biológicos complejos, como la contracción de los músculos, transmisión de los impulsos nerviosos, la fotosíntesis, el funcionamiento de las membranas celulares, etc. Es verdad, que hace falta tener cierta precaución al emplear este enfoque, ya que la física de los cristales líquidos está desarrollada para los medios bastante homogéneos en grandes escalas, lo que no se puede decir sobre los objetos biológicos. En el último caso los elementos estructurales pueden tener *dimensiones conmensurables con el tamaño* de las moléculas (de ejemplo sirven las membranas celulares).

La segunda peculiaridad notable de los cristales líquidos es la capacidad de sus moléculas a la autoorganización, es decir, a la formación de las estructuras ordenadas (recordemos, por ejemplo, *la estructura espiral de los colestéricos*). Esta peculiaridad, sin duda alguna, no escapó de la atención de los biólogos con relación a que se intenta aplicar las representaciones correspondientes para examinar los procesos de autorreproducción de las moléculas en la célula, los problemas de la evolución, etc.

Tercero, por fin, la alta sensibilidad de los cristales líquidos a las influencias exteriores, tales como la tempera-

tura, impurezas ajenas, la luz, los campos exteriores, etc., sugiere a los investigadores nuevos enfoques para aclarar los mecanismos del funcionamiento de los receptores de los órganos de los sentidos.

Vamos a estudiar algunas de las aplicaciones de los cristales líquidos a la biología, empezando por la exposición detallada de las propiedades de las soluciones acuáticas de las moléculas orgánicas.

§ 2. EL AGUA Y LAS MOLÉCULAS DE COLA LARGA

El agua es la base de todo lo viviente. Por ejemplo, constituye un 66% de toda la masa del cuerpo humano y un 95% de la medusa. El agua cumple una serie de funciones importantes. Es un perfecto disolvente para las sales minerales y otras sustancias, las cuales deben introducirse al organismo y expulsarse de éste durante el metabolismo. Al mismo tiempo las sustancias que son necesarias para guardar la integridad de la estructura del organismo son absolutamente insolubles en el agua. Entre todos los líquidos conocidos el agua tiene la capacidad calorífica más grande, lo cual es muy esencial para la conservación del balance térmico del organismo con el medio ambiente. Las propiedades record del agua como solvente de los conjuntos iónicos y su extraordinariamente alta capacidad calorífica están condicionadas por su estructura específica (fig. 126). Ante

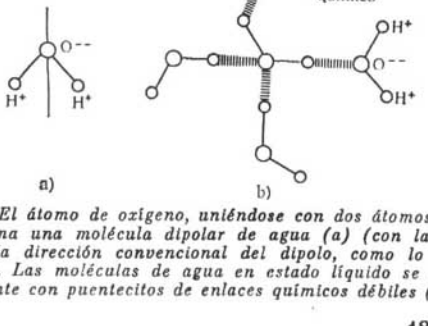


FIG. 126. *El átomo de oxígeno, uniéndose con dos átomos de hidrógeno, forma una molécula dipolar de agua (a) (con la flecha se muestra la dirección convencional del dipolo, como lo hacen los químicos). Las moléculas de agua en estado líquido se enganchan mutuamente con puentecitos de enlaces químicos débiles (b).*

todo, señalemos que 2 iones de hidrógeno con carga positiva y un ion de oxígeno con carga negativa en la molécula de agua se sitúan en forma de un triángulo, de modo que se obtiene un dipolo, mostrado por la flecha en la fig. 126, *a*. Pero lo más importante es que en el agua líquida las moléculas no son libres, sino que están unidas entre sí mediante enlaces químicos bastante débiles (entre los átomos de oxígeno e hidrógeno), como lo ilustra la fig. 126, *b*. Cada molécula de agua resulta relacionada con cuatro moléculas vecinas. Al calentarla, una parte de energía se emplea para la ruptura de los enlaces y eso explica la alta capacidad calorífica del agua.

Si quisiéramos disolver en el agua una molécula orgánica grande, tendríamos que meterla forzosamente en la "red acuática", destruyendo muchos enlaces químicos. Esto no es ventajoso desde el punto de vista energético. He aquí el porqué la orgánica (si ella no lleva carga eléctrica, como en el caso de los colorantes iónicos, véase § 4 del cap. II) no se disuelve en el agua, como si se expulsase de ella. De este modo, las propiedades insólitas del agua se determinan enteramente por su estructura especial.

Una situación interesante surge, cuando en la misma molécula están unidas dos partes, una de las cuales está cargada y podría por sí misma disolverse en el agua y la otra no tiene carga y por eso es insoluble (véase la fig. 38, *a*). Entonces, según la concentración de estas moléculas en el agua se puede observar la siguiente cadena de los sucesos.

Supongamos que hay mucha agua y pocas moléculas cargadas que tienen colas. Entonces todas ellas podrán fácilmente ubicarse en la superficie del agua de modo que las cabezas con cargas sean sumergidas en el agua (merced a la atracción por parte de sus cargas) y las colas, como flo-

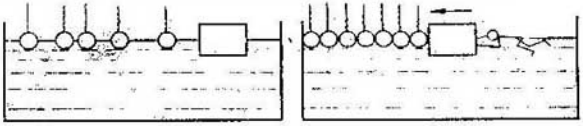


FIG. 127. *Las moléculas "renacuajos" que nadan en la superficie del agua con las colas hacia arriba (a) pueden fácilmente desplazarse con ayuda de la valla flotante de modo que se forme una capa monomolecular densa (b).*

tadores, sobresalgan evitando de este modo el contacto con el agua (fig. 127, *a*). Estos flotadores moleculares pueden desplazarse juntos con ayuda de la valla flotante como está mostrado en la fig. 127, *b*. Al principio, la valla va a sentir una reacción muy débil por parte de las moléculas, pero cuando éstas se unan todas, su reacción aumentará bruscamente. Este proceso se parece mucho a la compresión del gas por el émbolo. El émbolo va fácilmente hasta que el gas se transforme en líquido, el cual prácticamente es incompresible. Puede decirse que en este caso tenemos un gas bidimensional (y no tridimensional) y un líquido bidimensional.

Si las moléculas estuviesen situadas en la superficie del agua caóticamente, formando sin embargo una capa monomolecular densa (del espesor de una molécula), realmente tendríamos un verdadero líquido bidimensional. Pero en nuestro caso las moléculas no sólo pueden trasladarse en el plano de la capa, sino que conservan también la misma orientación. Entonces, es cuando tenemos un cristal líquido bidimensional (una capa del esméctico).

Ahora aumentaremos la concentración de las moléculas-"renacuajos". La superficie del agua quedará muy rápido ocupada. Pero, resulta que existe un procedimiento para aumentarla artificialmente. Y los "renacuajos" lo encuentran con facilidad (fig. 128, *a*). Evitando el contacto con el agua, las colas de las moléculas se esconden dentro de las esferas, formadas por cabezas dipolares, creando las denominadas *micelas* (de la palabra latina *mica* que significa miga). Las micelas tienen una forma esférica y la solución en total parece a una suspensión de las partículas sólidas en el líquido. En la luz polarizada esta solución no posee birrefringencia. En lo que se refiere a la envoltura de una micela separada siguen siendo válidas las razones que hemos expuesto sobre la naturaleza de la capa monomolecular.

Aumentaremos más aún la concentración de las moléculas con colas o disminuiremos la concentración del disolvente. La cantidad de las micelas esféricas crecerá hasta que ellas no empiecen a pegarse. Para lavar las micelas esféricas ya es insuficiente la cantidad de agua presente y surge una nueva geometría (fig. 128, *b*). Las micelas toman forma de cilindros, estrechamente colocados uno junto al otro y en su sección forman un empaquetamiento tipo hexágonos. Ahora las propiedades ópticas de la solución dependen mucho de la dirección en que miramos: a lo largo o a tra-

vés de los cilindros. La solución posee birrefringencia fuerte y al mismo tiempo puede chorrear. Nos encontramos frente a un verdadero cristal líquido. Los cristales líquidos de este tipo, obtenidos disolviendo una sustancia en otra, se llaman *liotrópicos* (de la palabra griega "lio" — disuelvo).

Vamos a ser insistentes y continuaremos el experimento con esta solución extraña. Añadamos más moléculas con cola o, lo que es lo mismo, evaporemos una parte del agua. Entonces resulta imposible una estructura cilíndrica de la solución y ella adquiere forma de una pila de capas paralelas (fig. 129). Y otra vez las colas largas evitan el contacto con el agua y el agua forma capas intermedias muy finas entre las capas de la sustancia. Para estas capas intermedias aún es suficiente la cantidad de agua y ésta desempeña el papel de lubricante que permite a las capas deslizarse con facilidad una respecto a otra. Esto es precisamente aquel jabón, del cual ya hemos hablado con relación a la fig. 105 y el que dio el nombre a una clase entera de cristales líquidos esmécticos. De este modo, el "pastel" de capas en la fig. 129 es, por su origen, un cristal líquido liotrópico y, por su estructura, esméctico.

Si disminuimos más aún la concentración de agua, obtenemos nuevos cuadros mostrados en la fig. 130. Estas son estructuras volteadas. Ya hay tan poca agua que ahora no tenemos una solución de "renacuajos" en el agua, sino que, al contrario, más bien el agua está disuelta en ellos. Ella puede existir en forma de cilindros (fig. 130, *a*) y si hay muy poca agua, en forma de esferas pequeñas (fig. 130, *b*).

Prestemos atención a que el principio inicial, conforme al cual se ponen en contacto con el agua sólo las cabezas

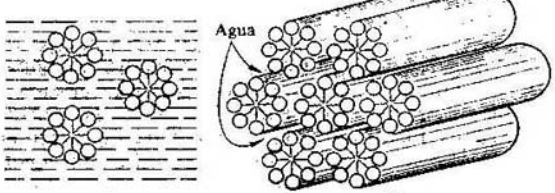


FIG. 128. *Las micelas esféricas flotan libremente en el agua (a), y las cilíndricas se empaquetan en una estructura hexagonal (b).*

dipolares de las moléculas y no las colas, se cumple también en estos dos casos. Lo que vemos en la fig. 130, *b*, hablando en rigor, no es un cristal líquido. Este es un cristal sólido, en el cual se intercalan cuerpos extraños de una estructura de cristal líquido (así como en el caso de las micelas esféricas). La estructura, ilustrada por la fig. 130, *a*, aún puede considerarse de cristal líquido.

Evaporando las últimas gotas de agua, recibiremos un verdadero cristal sólido, en el cual las moléculas están fijadas exactamente en sus sitios, sus colas son inmóviles y ajustadas estrechamente una a otra y hay un orden estricto en todas las direcciones (fig. 131).

Semejante cadena de sucesos fue construida por nosotros de modo puramente lógico. En la vida se puede observar sólo sus eslabones aislados. Para unas sustancias, por ejemplo, puede verse la transición sucesiva de una situación, mostrada en la fig. 127, a la mostrada en la fig. 129, para otras son conocidas las estructuras volteadas. Esto de-

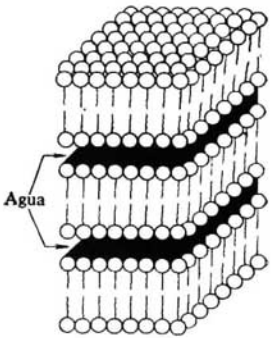


FIG. 129. *La estructura de capas del cristal líquido liotrópico.*

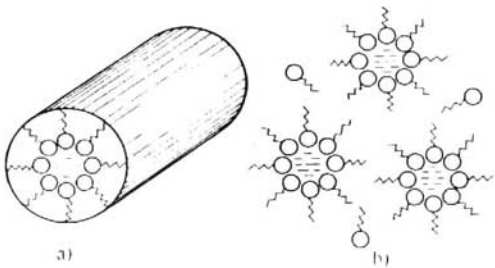


FIG. 130. *Las "micelas-volteadas" cilíndricas (a) y esféricas (b) dentro de las cuales hay moléculas de agua.*

pende de la estructura concreta de las moléculas-"renacuajos". En particular, las moléculas de los ácidos grasos tienen una cabeza dipolar y una cola y forman fácilmente micelas esféricas que se dan en la fig. 128, *a*. Pero las moléculas de los fosfolípidos (los lípidos son grasas) que juegan un papel exclusivamente importante en los organismos vivos, tienen dos colas, unidas a una cabeza, y no forman micelas. La causa está en que dos colas no tienen sitio en una micela. Por eso las moléculas de los fosfolípidos forman capas dobles planas exclusivamente estables, cuya estructura puede ser muy variada (fig. 132).

§ 3. CÉLULAS Y MEMBRANAS

La enorme diversidad de organismos vivos, empezando por las bacterias y los infusorios y terminando por el hombre, tienen un rasgo común, que destaca ostensiblemente estos organismos en el fondo de la naturaleza muerta. Todos ellos poseen estructura celular. Las células son unos ladrillos pequeños y muy complejos, de los cuales está construido todo el organismo vivo. La forma y los tamaños de las células pueden ser los más diversos. Las células más pequeñas (por ejemplo, las bacterias) pueden ser de un tamaño

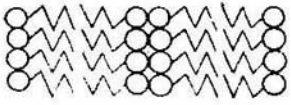


FIG. 131. *Para el cristal es característica la disposición ordenada de las colas moleculares.*

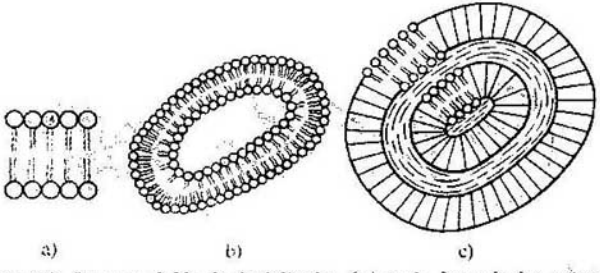


FIG. 132. *La capa doble de fosfolípidos (a) es la base de las estructuras cerradas (liposoma) de distintos tipos (b y c).*

de 1 μm y las más grandes pueden alcanzar una longitud de 1 m y más. A pesar de las diferencias esenciales en la forma y los tamaños, las células de los organismos, hasta en los muy poco parecidos, tienen una semejanza asombrosa. Todas ellas están rodeadas de una envoltura exterior —membrana celular—, dentro de la cual hay un núcleo celular y otras partículas, o sea, organelas intracelulares (fig. 133). Cada organela responde por algunas funciones de la célula, vitalmente importantes. Así, por ejemplo, en el núcleo se halla la reserva de la información genética, que determina todos los caracteres hereditarios de dicho organismo, las mitocondrias pueden llamarse "estaciones eléctricas" de la célula que transforman la energía de las sustancias alimenticias en una forma biológicamente útil, las ribosomas son la "fábrica de materiales de construcción" en la cual se realiza la síntesis de las moléculas de la proteína, etc. Todas las organelas están separadas del líquido intracelular también mediante envolturas finas (membranas) que cumplen funciones extraordinariamente importantes, las cuales se deben estudiar especialmente. Seguramente es necesario empezar con que la membrana exterior (plasmática) es un sostén mecánico y aislador eléctrico de las células que les permite conservar su integridad y singularidad. En el caso de las células vegetales por encima de la membrana plasmática hay una envoltura celular rígida más, para la cual material se desprende de la membrana.

Se sabe que al elaborar el tejido vivo, las células reconocen fácilmente a sus compañeros y rechazan activamente a los "extraños". La identificación de sus parientes también se realiza por la membrana exterior de la célula. Al final de este capítulo sabremos lo que ocurre cuando esta función se infringe.

En la célula todas sus organelas trabajan constantemente para lo cual se necesita energía. La energía es suminis-

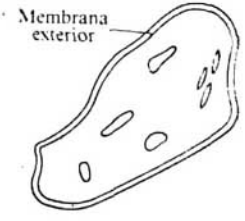


FIG. 133. *La célula del organismo vivo está rodeada, por afuera, de una membrana y, por dentro, tiene diferentes organelas.*

trada a cuenta de la oxidación de las moléculas de los productos alimenticios durante la respiración celular y se transforma inicialmente en la energía de los enlaces químicos de los grupos de fosfatos de la molécula biológica compleja que se denomina brevemente ATP (trifosfato de adenosina). Este proceso de la fosforilación oxidante transcurre en la membrana que rodea las mitocondrias celulares.

El compuesto del líquido de la célula por afuera y por dentro no es igual. En particular, las concentraciones de los iones de determinado tipo en distintos lados de la membrana celular pueden diferenciarse en decenas de veces. La membrana en este caso juega el papel de filtro activo que funciona selectivamente, que introduce a la célula y saca de ella las más diversas sustancias. Además, la membrana muy a menudo tiene que trasladar los iones (por ejemplo, del sodio) del sitio donde los hay pocos hacia donde los hay muchos. Con ayuda de la difusión simple este proceso, claro está, no puede transcurrir y la membrana cumple el papel de una bomba que "desplaza" los iones. Este traslado activo de las sustancias a través de la membrana es extraordinariamente importante para que el medio interior del organismo sea constante al cambiar las condiciones exteriores.

La membrana exterior posee también una capacidad asombrosa de apoderarse de distinto material, que está fuera de la célula de modo puramente mecánico, envolviéndolo así como está mostrado en la fig. 134. La membrana puede "tragar" partículas bastante grandes, las cuales no podrían nunca pasar a través de la membrana debido a la difusión o hasta un traslado activo. El proceso se llama *pinocitosis* y uno de los modelos que explica este fenómeno, lo estudiaremos un poco más tarde.

Las membranas son matrices para las moléculas importantes desde el punto de vista biológico, que desempeñan

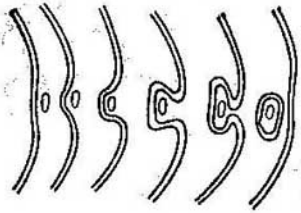


FIG. 134. *La célula puede captar grandes partículas con ayuda de su membrana. El orden de los sucesos va de izquierda a derecha.*

el papel clave en el trabajo de distintos receptores (visual, olfatorio, etc.). En las hojas verdes transcurre el proceso de fotosíntesis del hidrato de carbono a partir del gas carbónico con desprendimiento de oxígeno gaseoso. Ella se realiza a través de las moléculas de clorofila introducidas en las membranas de las organelas especiales, es decir, los cloroplastos.

Por fin, las membranas de las células de los tejidos nerviosos (las neuronas) juegan el papel decisivo en los procesos de la propagación de las señales eléctricas por las fibras nerviosas.

De esta simple enumeración se ve que las membranas participan prácticamente en todos los procesos vitalmente importantes que ocurren en el organismo. El estudio de las membranas resulta un método muy fecundo cuando quieren descubrir los enigmas de la actividad vital de la célula. Y aunque todo esto fue comprendido no hace mucho, ya se ha formado una nueva ciencia completa —membranología— de la que ahora se espera mucho.

Sin duda, las membranas son una cosa muy interesante, dirá el lector descontento, pero sobre ellas se puede leer en otros libros. Y ¿qué tienen que ver los cristales líquidos con ellas? Pues ahora precisamente queremos demostrar que las membranas no son más que las conocidas estructuras de capas.

Según las concepciones modernas, la membrana biológica representa una capa doble, compuesta de los fosfolípidos y algunas otras moléculas-"renacuajos", cuyas propiedades ya hemos estudiado. Dentro de esta capa doble están incrustadas las moléculas grandes de las proteínas. Ellas pueden atravesar la membrana, sumergirse en ella sólo parcialmente o, en general, estar en la superficie de la capa doble (fig. 135). Precisamente estas moléculas de proteína sirven de catalizadores de reacciones químicas, que se desarrollan

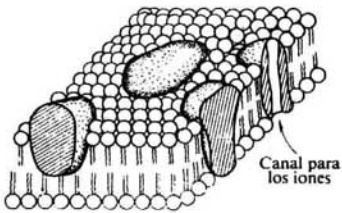


FIG. 135. *En la membrana biológica las moléculas grandes de proteínas están incrustadas en una capa doble de fosfolípidos o están sobre su superficie.*

en las membranas, de los reconocedores de las células suyas y ajenas, de los receptores de las señales, etc.

Comparando las figs. 105, *a* y 135 se puede ver que la membrana biológica representa un antípoda de la envoltura de pompa de jabón. Esto no debe sorprender ya que la célula funciona en un medio líquido y la pompa de jabón "vive" en el aire, reteniendo el agua dentro de su envoltura. Al mismo tiempo la estructura de capas periódica, dada en la fig. 129, contiene el elemento principal de la membrana, o sea, la capa lípida doble. ¿Esta semejanza es suficiente para considerar la membrana como un cristal líquido? Por lo visto no, pues sus moléculas pueden, en principio, formar también un empaquetamiento cristalino, mostrado en la fig. 131. Sin embargo, fueron realizados experimentos especiales (en membranas de capas dobles artificiales) que demostraron que las colas largas moleculares dentro de la membrana están en el estado desordenado, característico para el cristal líquido. En estos experimentos se utilizan las señales moleculares especiales, las cuales se introducen dentro de la membrana. Los métodos ópticos finos y radiotécnicos permiten observar el movimiento de estas señales y de este modo estudiar las propiedades de la membrana. La observación de estas señales demostró que las moléculas con colas de los fosfolípidos se trasladan más o menos libremente a lo largo de la superficie de la membrana, quedándose dentro de los límites de su capa. Las velocidades de este traslado son relativamente grandes: durante 1 s la molécula puede desplazarse a lo largo de la capa en algunos micrometros, lo que compone décimas del perímetro de la célula. Pero saltar de la capa superior de la membrana a la inferior o al revés, es excesivamente difícil para las moléculas de los fosfolípidos, por eso estos sucesos suelen ocurrir raras veces, por ejemplo, una vez cada hora o con menor frecuencia. Las moléculas grandes de las proteínas son poco movibles incluso en el plano de la capa doble.

De este modo, la membrana tiene una estructura de capas, pero dentro de la capa no existe orden. Entonces su estructura corresponde al cristal líquido esméctico (*A*). Y esta estructura es, en principio, importante para el funcionamiento de la membrana. Así, por ejemplo, las membranas se niegan a cumplir sus obligaciones durante la cristalización, provocada por la disminución de la temperatura.

§ 4. CRISTALES LÍQUIDOS Y COMPORTAMIENTO DE LAS MEMBRANAS

Si las membranas tienen la estructura de cristal líquido, surge la pregunta natural: es posible, aunque sea parcialmente, comprender el mecanismo de su trabajo, partiendo de las ideas de la física de los cristales líquidos, estudiadas en los capítulos anteriores. Resulta que algunas veces esto es posible. Por ejemplo, desde hace mucho tiempo a los biólogos les sorprendía la forma de los glóbulos rojos de la sangre, o sea, los eritrocitos. En condiciones habituales ellos tienen forma de discos con la superficie cóncava hacia adentro. El eritrocito es una célula aislada, rodeada por una membrana, con la particularidad de que esta última consta de dos capas que se diferencian por su estructura molécular. Entonces, la elasticidad de estas capas que se opone a la flexión de la membrana también es distinta. Analizando los gastos energéticos en la flexión de dos capas esmécticas, se logra demostrar que para una diferencia determinada de presiones entre las partes interior y exterior de la membrana celular, a ella le es más ventajoso adquirir la forma cóncava. Por su parte la forma cóncava es necesaria a los eritrocitos porque les permite fácilmente infiltrarse en los vasos sanguíneos muy finos y también apretarse más estrechamente contra las paredes de los vasos de los alvéolos pulmonares donde los eritrocitos reciben el oxígeno directamente a través de estas paredes.

A base de las representaciones conocidas de la física de los cristales líquidos, se explica fácilmente también el mecanismo del "curamiento" de los poros pequeños en las membranas. Para cualquier agujero redondo de radio R en las membranas la razón del área (πR^2) al perímetro ($2\pi R$) aumenta, al crecer el radio. La aparición del agujero en la membrana disminuye la energía de la tensión superficial en una magnitud proporcional al área del agujero. Esto es la ventaja en la energía. La pérdida en la energía (aumento) relacionada con la formación del defecto (los límites del agujero), es proporcional al perímetro (fig. 136). Mientras que el agujero sea pequeño, la diferencia en energías es a favor de éste y el agujero aparecido casualmente "se cicatriza". Al crecer el radio R, se alcanza el tamaño crítico, por eso, si aparecen agujeros grandes, ellos empiezan automáticamente a crecer más y la membrana se destruye.

Partiendo de consideraciones muy simples se puede tra-

tar de explicar también el fenómeno enigmático de la pinocitosis ilustrado en la fig. 134. Para eso primero probaremos mentalmente encorvar cada una de las dos membranas formadas de las moléculas cuneiformes. Estas membranas se dan en la fig. 137. Encorvando la primera membrana de dos capas (fig. 137, *a*), mejoramos las condiciones para el empaquetamiento más ajustado de la capa exterior, pero las empeoramos para la interior. Para la segunda membrana la situación es precisamente inversa. Pero el radio de curvatura y el perímetro para la capa interior siempre son menores que para la exterior. Esto significa que en la capa interior de la membrana encorvada las moléculas están situadas más cerca la una de la otra. De aquí se desprende una deducción evidente: para la primera membrana la curvatura no es ventajosa y para la segunda lo es por eso la segunda membrana siempre hace todo lo posible para encorvarse y adquirir una forma cerrada.

Ahora para explicar el fenómeno de la pinocitosis es necesario sólo suponer que la partícula, acercándose a la membrana, cambia la forma geométrica de las moléculas de fosfolípidos. Esto puede ocurrir girándose la parte dipolar de

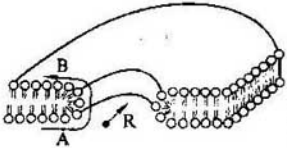


FIG. 136. *Las moléculas de los fosfolípidos pueden pasar de la capa inferior* A *a la capa superior* B *y al revés, utilizando el borde del agujero (radio R).*

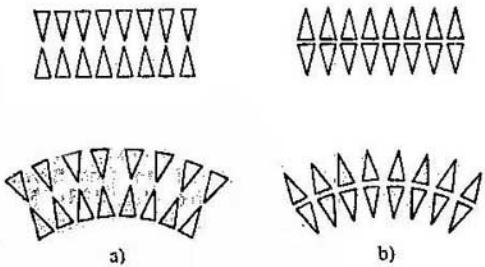


FIG. 137. *Cuando se encorva la membrana compuesta de moléculas cuneiformes, en la capa interior el empaquetamiento molecular se hace más ajustado. La curvatura en el caso (b) es desde el punto de vista energético más ventajosa que en el caso (a).*

la molécula, la cual sería mejor imaginársela como una "cabeza en el cuello" (fig. 138). El paso de esta parte a la posición vertical cambia la forma de toda la molécula. Si antes ella se parecía a una cuña, cuya punta estaba dirigida hacia abajo, ahora la molécula asemeja a una cuña con la punta hacia arriba. Esta forma es inestable respecto a la curvatura, la membrana empieza a encorvarse por si misma y atraer la partícula (fig. 134). Después, las moléculas de los fosfolípidos recuperan su forma y la parte de la membrana que queda adquiere de nuevo su estructura plana. Este modelo simple y bonito de la pinocitosis fue propuesto hace poco y por ahora aún no está comprobado por ningún hecho experimental.

Continuemos nuestros experimentos con la encorvadura de la membrana. Supongamos que hay una membrana compuesta de las moléculas cuneiformes (con las puntas hacia adentro, fig. 137, *a*) y supongamos también que durante la encorvadura las moléculas pueden de cierto modo trasladarse de una capa a otra. Es evidente que al encorvarse la capa doble, las moléculas están en "un tabuco" en la capa interior y, al revés, tienen demasiado espacio en la capa exterior. Sin embargo, para saltar de capa en capa dando volteretas, las moléculas necesitan superar cierta barrera energética (aproximadamente así, como en la fig. 78) y este proceso requiere mucho tiempo. Si en la membrana hay agujeros, el traslado de las moléculas de capa en capa puede ocurrir sin saltos. En la fig. 136 está mostrado con linea de trazos cómo la molécula de la posición A puede pasar a la posición B, utilizando el borde de la membrana en el punto de su ruptura. Estas rupturas pueden ser estables, si están fijadas por cualesquiera moléculas grandes.

Sea, así o de otro modo, que una parte de las moléculas a pesar de todo pase de la capa interior a la exterior encorvándose la mem-

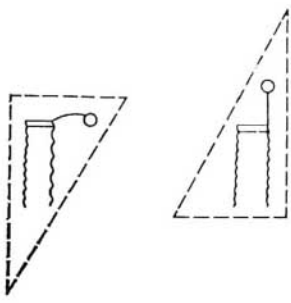


FIG. 138. *La desencorvación de la parte dipolar da la vuelta a la cuña convencional que describe la forma geométrica general de la molécula del fosfolípido.*

brana. Pero es que con ellas está relacionado el dipoloeléctrico, por ejemplo, dirigido así, como está mostrado en la fig. 139, *a*. Y si antes el número de dipolos orientados hacia arriba y hacia abajo era igual, ahora esto no es así, y la membrana completa tiene un gran dipolo sumario **P**, dirigido desde el interior al exterior.

El campo de este dipolo sumario puede influir sobre las partículas cargadas que se encuentran dentro o afuera de la membrana encorvada. Por ejemplo, el campo obliga a los iones positivos a moverse desde el interior hacia el exterior a través del agujero en la membrana incluso si la concentración inicial de los iones es más alta en el exterior que en el interior. Hemos obtenido uno de los mecanismos del traslado activo de los iones a través de la membrana.

Otra manifestación del fenómeno recién estudiado, es la interacción de las moléculas complicadas de proteína una con otra no inmediata, sino indirectamente, o sea, a través de la membrana. Realmente si una de las moléculas de proteína en el modelo mostrado en la fig. 135, cambia su forma al interaccionar con cualquier sustancia química, esto inevitablemente llevará a cierta curvatura de la membrana. Por su parte la curvatura redundará en el estado de otras moléculas fijadas dentro o en la membrana a una distancia de la primera. De este modo las moléculas "conocen" lo que pasa con sus vecinos lejanos de la membrana y pueden participar en distintas acciones colectivas.

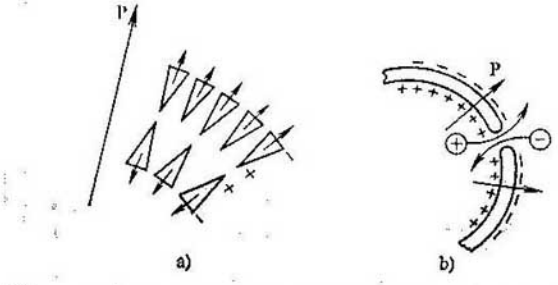


FIG. 139. *Al encorvarse la membrana la parte de los dipolos se expulsa de la capa interior a la exterior de modo que en la membrana aparece un dipolo sumario (a). El dipolo que surge a causa de la curvatura, obliga a los iones que pasen a través del agujero en la membrana (b).*

Ahora vamos a discutir en pocas palabras otro problema más, con el cual las propiedades de cristal líquido de las membranas tienen por lo visto una relación cercana. Se trata de uno de los mecanismos biofísicos interesantes, o sea, sobre la transmisión de impulsos de excitación por los tejidos nerviosos. Para hoy día están aclarados muchos detalles de este mecanismo, pero no todos. La mayoría de los experimentos fueron hechos en la fibra, que representa una célula nerviosa de gran tamaño (el espesor de hasta 1 mm y la longitud de varios centímetros) sacada del calamar. El calamar necesita una célula tan grande porque utiliza el principio reactivo del movimiento el cual exige la coordinación casi instantánea del trabajo de todos los músculos que lanzan un chorro de agua. Y por las fibras nerviosas gruesas, como resultó, la señal de excitación se propaga más rápido. En esta célula gruesa, rodeada por la membrana (fig. 140), se logró introducir unos microelectrodos y estudiar sus propiedades eléctricas.

Se descubrió el siguiente cuadro. En el estado de reposo la superficie exterior de la membrana que rodea la fibra, está cargada positivamente con relación a la parte interior hasta un potencial de 50 mV (fig. 140, *a*). Esto está relacionado con la diferencia en las concentraciones de iones de potasio y de sodio dentro y fuera de la célula (la cantidad de iones de potasio y de sodio dentro de la célula es 30 veces más que fuera de la misma. En estado de reposo la membrana fácilmente saca el sodio de adentro hacia fuera, pero no al revés. En estos casos dicen que trabaja la bomba de sodio la cual utiliza la energía de enlaces de fosfatos ATP.

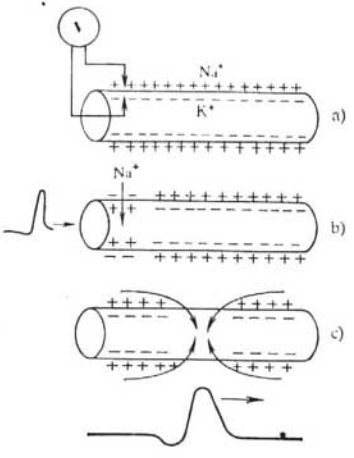


FIG. 140. *El orden de los sucesos al excitar la fibra nerviosa (a — c) y la forma del impulso nervioso (d).*

Al influir sobre la fibra nerviosa, la señal eléctrica se amortigua muy rápido, pasando sólo algunos milímetros, como por un cable malo. La fibra nerviosa, en realidad, es un cable malo, que no puede trasmitir las comunicaciones a grandes distancias, si en ella no están instalados amplificadores especiales. Pero estos amplificadores precisamente funcionan en la fibra nerviosa: son las bombas de iones de sodio y potasio dirigidas por un impulso eléctrico fuerte.

La excitación fuerte de la célula conduce a la desconexión de la bomba de sodio y un aumento brusco (20 veces) del paso inverso de sodio a través de la membrana hacia adentro de la célula a cuenta de la difusión habitual (y al aumento del desprendimiento del potasio desde adentro hacia afuera). Este "cortocircuito" eléctrico de la membrana provoca la caída de potencial de su superficie exterior primero hasta cero (con relación a la interior) y después hasta un valor negativo. Después de eso cesa la corriente de sodio hacia adentro de la membrana. Pero como en reposo la membrana de toda la fibra en total es un condensador cargado, el cortocircuito de sus "placas" en un sitio no queda desapercibido en las partes vecinas (fig. 140, *c*). Y de este modo pasivo la excitación eléctrica pasa a la parte vecina, donde todo el proceso se repite de nuevo. El impulso va relativamente despacio (decenas de metros por segundo) y esta velocidad puede calcularse, aplicando las ecuaciones matemáticas, conocidas de la teoría de las líneas de cables de comunicación. La forma del impulso nervioso está mostrada en la fig. 140, *c*.

El sitio central y el más incomprensible en todo este cuadro es precisamente el mecanismo de acción de la bomba de sodio, su puesta en marcha y desconexión. En general a través de la membrana ideal, formada por dos capas de fosfolípidos (fig. 132, *a*) los iones cargados no pueden pasar. Por eso en la membrana tienen que incrustarse las moléculas grandes que forman canales para los iones o el ion debe estar en la estructura de la molécula-traslador, disoluble en la capa de fosfolípidos. Se puede decir que en este caso el ion debe primero ponerse un escafandro especial y ya después viajar a través de la membrana. Estas moléculas-escafandros fueron descubiertas no hace mucho. Se han encontrado también moléculas, que forman los canales para los iones (ionofores). Ahora nos queda por comprender el mecanismo de conexión y desconexión de estos canales. ¿Y no nos ayudarán aquí los cristales líquidos?

Por ejemplo, se puede tomar en consideración que las moléculas de la membrana de cristal líquido bajo la acción del campo del impulso nervioso cambian de orientación. Cada una de las dos capas de la membrana de fosfolípidos tiene un gran dipolo formado por la suma de los dipolos moleculares. En el campo eléctrico provocado por la descarga en las partes vecinas de la membrana y dirigido perpendicularmente al dipolo sumario de la membrana, sus moléculas pueden reorientarse de modo tal que este dipolo se ponga a lo largo del campo. Este proceso se parece a la transición de Frederiks para el nemático en el campo eléctrico, pero debe manifestarse más fuerte, ya que el campo interacciona con el gran dipolo sumario, como en el caso de los esmécticos ferroeléctricos. Desde luego la reorientación de las moléculas de fosfolípidos provoca la reorientación de las moléculas-canales y moléculas-escafandros según el tipo efecto "huésped—amo". Entonces esta reorientación resultará aquel mismo "conmutador" que dirige el funcionamiento de las bombas iónicas.

Digamos ahora algunas palabras sobre los aspectos químicos de funcionamiento de las membranas. Como ya se dijo, las membranas realizan los procesos de la síntesis química de algunas moléculas que son vitalmente importantes para el organismo. Aquí, el carácter de cristal líquido de la membrana se manifiesta de dos formas. Primero, como en el efecto "huesped—amo" la membrana de cristal líquido orienta a las moléculas de catalizadores (fermentos), asegurando la geometría necesaria de su interacción con las moléculas que entran en la reacción. Esto aumenta bruscamente la selectividad de las moléculas con respecto a sus compañeros de la reacción y aumenta la velocidad de las mismas reacciones. Se conocen por ejemplo, casos cuando la reacción que se desarrollaba en el cristal líquido liotrópico de capas, iba cien veces más rapido que en un habitual disolvente que no era de cristal líquido.

La segunda peculiaridad de las membranas de cristal líquido, esencial para la síntesis de las moléculas biológicas, surge de sus características eléctricas. El traslado de los electrones e iones a través de la membrana se realiza en presencia de un campo eléctrico fuerte dirigido de modo completamente determinado. Esto nos permite transformar la energía química en la energía del campo eléctrico y al revés. Además el campo eléctrico puede jugar el papel del sistema que dosifica y "empaqueta" la energía en porciones

pequeñas suficientes para la formación de enlaces químicos necesarios. Este mecanismo de dosificación de la energía puede resultar importante, por ejemplo, en las reacciones de oxidación de los productos alimenticios directamente relacionadas con la reacción de la síntesis de ATP (la respiración celular) y también con la distribución de la energía por las moléculas ATP para distintas necesidades de la célula.

Por fin, partiendo de la analogía con los procesos tecnológicos estudiados antes a base de los cuales se obtienen las fibras poliméricas muy resistentes se puede suponer que la solidez de los tejidos biológicos en algunos casos está condicionada por su "montaje" de las moléculas de proteína (polímeras) en el estado ordenado de cristal líquido.

Para resumir apartémonos un poco de las membranas y miremos si hay algo común entre los pasos de un estado de cristal líquido al otro y ... la gimnasia por la mañana.

Actualmente en la literatura científica muy a menudo se oyen voces sensatos a favor de que el estado de cristal líquido juega un papel de importancia en los procesos de movimiento biológico. Así pues, en el primer lugar tienen en cuenta los mecanismos de la contracción de músculos, los movimientos de las células, los traslados de unas moléculas (por ejemplo, fermentos) a lo largo de las otras (por ejemplo, proteínas), etc. Sobre todo parece misterioso el mecanismo de la contracción muscular en el proceso de la cual la energía química que se desprende con la hidrólisis de las moléculas de ATP, inmediatamente se convierte en la mecánica. La contracción de los músculos se realiza a causa del deslizamiento de unas moléculas polímeras con respecto a las otras, en este caso el haz de hilos finos formados por las moléculas de proteína de la actina como si se metiese en el haz de hilos gruesos, formados por las moléculas de otra proteína, la miosina. La investigación con los rayos X de los músculos vivos (que accionan) mostró gran analogía de su estructura con la de los cristales líquidos, por eso algunos científicos suponen que también el proceso de interacción entre las moléculas de actina y miosina se puede comprender en los principios de las ideas desarrolladas por la física de los cristales líquidos. En particular, en el idioma de los cristales líquidos la contracción del músculo se puede considerar como un paso de un estado de cristal líquido al otro con el cambio de la densidad. En cuanto se realiza este enfoque lo veremos en el futuro.

§ 5. DE LA CIENCIA-FICCIÓN

El cerebro humano está preocupado desde los tiempos remotos por el problema de la inmortalidad y como se ve, es dudoso, que lo resuelva algún día. Pero la idea de cómo alejar el momento de la muerte, se basa en un fundamento científico serio. Se trata de la anabiosis artificial, o simplemente el letargo, provocado por uno u otro procedimiento. Uno de estos modos es la congelación del organismo.

Ahora no vamos a discutir el problema de la congelación de una persona viva. Con éste están relacionados no sólo muchos problemas científicos y técnicos sin resolver sino que todavía no está clara la parte ética y social de la cuestión. Sin embargo podemos imaginarnos un caso cuando a una persona que tiene una enfermedad incurable para el estado moderno de medicina, sea razonable de sumirla en el estado de anabiosis hasta el momento cuando sean encontrados remedios de curar esta enfermedad. Pero nadie sabe prever el futuro y es difícil decir cómo puede terminar todo esto. Por eso discutiremos mejor otros problemas también serios pero más terrestres de congelación de objetos vivos, a los cuales se dedica una ciencia bastante joven, *la criobiología.*

La congelación de las células sexuales juega un papel importante en el trabajo de los seleccionistas-ganaderos, la medicina necesita sumamente la reserva de sangre, de tejido vivo para las transplantaciones, etc. La congelación local de algunos órganos del cuerpo humano es necesaria para las operaciones quirúrgicas. En este caso el problema principal es la conservación de la integridad y capacidad de trabajo de las células del organismo después de recalentarlo. Las cuestiones del aumento de la resistencia al frío de los organismos y la lucha contra las congelaciones también están en la competencia de los criobiólogos.

Pero ¿qué pasa con las células vivas al congelarlas? El agua es su componente principal, por eso el factor más real es el deterioro mecánico de algunas células y tejidos en total por los microcristalitos del hielo que se formó. Sin embargo, el factor más importante de deterioro de las células se considera el aumento de la concentración del electrolito en la parte no congelada de la solución acuática, el cambio de la estructura (deshidratación) de las moléculas de proteína, el cambio de la composición lípida de las membranas, etc.

Se sabe, sin embargo, que al congelarse muy rápido, las células conservan su capacidad para el restablecimiento de sus funciones anteriores. Por ejemplo, la congelación muy rápida de los eritrocitos en el nitrógeno líquido permite conservarlos ilimitadamente mucho tiempo y después utilizarlos con éxito en la clínica. Esto tiene lugar porque con el "golpe térmico" la cristalización, es decir, la organización regular de los átomos o las moléculas en la red cristalina no tiene tiempo para realizarse y por eso la sustancia se queda en un estado vítreo o sea, sólido pero desordenado. Realmente la solución biológica conserva su estructura anterior.

Ahora ya es tiempo de acordarnos de los cristales líquidos. Para estas sustancias a diferencia de las soluciones acuáticas de electrolitos, la formación de estado vítreo a temperaturas bajas es un fenómeno muy habitual. A veces este estado se forma hasta con el enfriamiento lento. Por eso para los criobiólogos los cristales líquidos son interesantes desde dos puntos de vista. Primero, se podrían introducir en las células en vez de la solución acuática para el tiempo de la congelación sustituyéndolos en la descongelación. Esto permitiría conservar la integridad de la estructura celular. Segundo, existen caminos de modificación de las disoluciones acuáticas celulares para comunicarles propiedades de los cristales líquidos. Para esto se podría incluir en las células las moléculas-"renacuajos" sobre los que se ha dicho al principio de este capítulo. Si se pudiera no perturbar las funciones biológicas principales de la célula, sino aumentar la capacidad del líquido celular de vitrificarse en vez de cristalizarse, el problema se podría considerar resuelto. Los experimentos en esta dirección se empezaron.

§ 6. UN CRISTAL BUENO ES UN MAL SÍNTOMA

El físico investigando un sólido siempre sueña con obtener en sus manos los cristales más grandes, más limpios y con la cantidad mínima de defectos de la estructura. El organismo vivo que funciona normalmente, no necesita en absoluto los cristales ideales. Su presencia, como regla, es indicador de cualesquiera procesos patológicos, como dicen los médicos.

El ejemplo, que ilustra lo dicho, es la aterosclerosis para la cual es característico el depósito de pequeños cristalitos sólidos de la colesterina en las paredes interiores de los vasos sanguíneos. Estos cristalitos dificultan la corriente de

sangre o hasta obliteran los vasos lo que trae enfermedad grave. En estos casos la colesterina del cristal malo (líquido) se pone bueno (sólido), pero los resultados de esto son precisamente contrarios. La situación parecida se observa formándose piedras biliares, en cuya estructura también entra la colesterina y varias sales.

Algunos científicos vinculan el envejecimiento del organismo con el proceso de la cristalización de las membranas. El paso de la membrana del estado de cristal líquido a uno más ordenado dificulta su función, particularmente, empeora las funciones de las bombas iónicas. Las membranas de fosfolípidos muy cristalizadas se descubren precisamente en los tejidos de los organismos viejos. Si este modelo de envejecimiento resulta correcto, hará falta buscar los medios que dificulten la cristalización de las membranas y ellos sin falta serán encontrados.

La observación esmerada de las células de tumor bajo el microscopio electrónico mostró la diferencia perceptible de su estructura respecto a las células normales. El estado químico de las ambas en general es igual, pero brevemente ellas se distinguen en la ordenación de algunos elementos. Por ejemplo, se cambia la disposición de las formaciones, que se encuentran directamente bajo la membrana y que determinan el movimiento de la célula así como la estructura de la membrana exterior. Las células sanas se trasladan activamente hasta que encuentren a sus parientes. Después, cuando reconocen a las suyas, se ponen en estrecho contacto con ellas y se detienen, formando un tejido homogéneo sin un claro entre células. Esto está mostrado en la fig. 141, *a*. Las células de tumor se reconocen mal entre sí, mal se juntan unas con otras (fig. 141, *b*) y lo más princi-

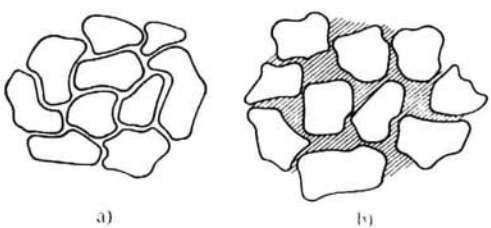


FIG. 141. *Las células sanas están pegadas unas a otras (a) y entre las células del tumor existen holguras (b).*

pal, no paran el proceso de su reproducción (división) una vez entradas en contacto una con otra. En este caso hay razones para opinar que en las células de tumor la estructura de cristal líquido de las membranas y formaciones filiformes está perturbada, si se puede decir así, en otro sentido, o sea, en el sentido de gran desorden (en comparación con el caso de la cristalización).

Sin duda, nuestro relato es bastante triste pero es necesario estudiar estos casos, para luchar contra ellos. Ya hay ejemplos cuando la ciencia sobre los cristales líquidos ayudó a curar enfermedades serias.

No hace poco, por ejemplo, fue utilizado el hecho de que la membrana de dos capas deja pasar a través de sí las determinadas sustancias medicinales sólo cuando ella está en el estado de cristal líquido y no les deja pasar si está en estado más ordenado, realmente sólido. Supongamos, por ejemplo, que es necesario introducir algún antibiótico directamente en el tejido de tumor. Para esto se preparan frasquitos microscópicos —liposomas (fig. 132, *b*)— en los cuales está el antibiótico. Estos frasquitos están rodeados por una membrana de dos capas, a través de la cual bajo la temperatura normal (los experimentos se hacían en los ratones) la medicina no pasa. Los frasquitos se introducen en la sangre y la sangre los lleva por todo el cuerpo. Los frasquitos cerrados no pueden hacer daño al organismo. Al mismo tiempo el tumor se calienta con las corrientes de la frecuencia ultraelevada. Debido al calentamiento las membranas de los frasquitos pasan al estado de cristal líquido y el antibiótico sale de ellos para atacar las células de tumor. El experimento mostró que gracias a este método la cantidad de medicina que cayó en el tumor, sobresale cuatro veces el valor medio para todo el organismo. Ahora los científicos trabajan por poder aumentar la sensibilidad de las membranas a los pequeños cambios de la temperatura. Los liposomas, llenos de medicina se utilizan con éxito también para la solución de los trombos en los vasos sanguíneos.

§ 7. ¿QUÉ NOVEDADES HAY EN LA EVOLUCIÓN?

La cuestión de qué empezó todo no da tranquilidad a la humanidad desde hace muchos siglos. El pensamiento fundamental, el cual reconocen hoy la mayoría de los científicos

es la idea evolutiva sobre el desarrollo de la vida en la Tierra a partir de la materia inanimada. Los enemigos de esta teoría se basan en la premisa de que la materia viva no puede engendrarse por sí misma y está traída a la Tierra de otros sistemas solares; sin embargo, por ahora no hay pruebas que la confirmen. De este modo, junto con el proceso largo de la evolución biológica según Ch. Darwin de los organismos elementales vivos a las variedades más complicadas, tenía que pasar un proceso no menos largo de la evolución química, que terminó formando una célula viva. Precisamente este proceso es el que nos interesa ahora.

La Tierra se formó hace 5 mil millones de años atrás, de los cuales los primeros 1,5 mil millones de años se gastaron en la evolución química, es decir, la obtención de los más primitivos organismos de una célula (bacterias). En aquel entonces la evolución química se desarrollaba en varias etapas. Es que para obtener organismos vivos, es necesario primero crear una célula, para obtener la célula son necesarias moléculas-polímeros complicadas (proteínas, ácidos nucleicos, etc.) y para la síntesis de ellas hacen falta sustancias iniciales más simples de tipo aminoácidos (para proteínas), purinas, pirimidinas y azúcares (para los ácidos nucleicos), hidratos de carbono, ácidos alifáticos, etc. Y todo esto hay que obtenerlo de la mezcla de las moléculas elementales del hidrógeno, el amoníaco, el metano y agua, las únicas que existían 5 mil millones de años atrás (sin duda, además existían minerales). En aquel entonces no había hasta oxígeno libre que apareció mucho más tarde, ya en la época biológica.

A pesar de todo, los experimentos directos nos muestran que la gran cantidad de moléculas orgánicas complicadas se puede recibir del "caldo primario" de sustancias elementales, si éste se irradia mediante una luz ultravioleta bastante rígida (de onda corta), rayos X o se dejan pasar a través de este "caldo" cargas eléctricas. En aquellos tiempos lejanos la naturaleza disponía de estos medios fuertes en exceso. Entre las moléculas obtenidas artificialmente hay algunos "ladrillos de construcción" para proteína y ácidos nucleicos, hay también hidratos de carbono y lo que es lo más interesante para nosotros hay ácidos alifáticos. Esto significa que ya en la primera etapa de la evolución podían formarse las películas de cristal líquido en la superficie de agua o en su volumen en forma de micelas, mostradas en la fig. 134.

Algunos azúcares también se reciben con el modelado de la primera etapa de evolución, si su síntesis se hace con la utilización de las sustancias portadoras sólidas en forma de arcillas minerales. Surge la pregunta de ¿podrían los ácidos alifáticos jugar su papel en la evolución, orientando algunos reactivos elementales y ayudando así sintetizar las moléculas complejas?

En la segunda etapa de la evolución, cuando se sintetizaban las cadenas polímeras a partir de los eslabones separados monomeros, tendría que ser aun más importante el papel de los disolventes capaces de orientar las moléculas de las sustancias que participan en la reacción, y de catalizar las reacciones correspondientes. En esta etapa surgió también gran diversidad de moléculas asimétricas especulares, o sea, antípodas ópticas. No se exceptúa que en su síntesis juegan un papel importante los cristales líquidos colestéricos como disolventes ópticamente derechos o izquierdos orientadores.

Y por fin, el sitio más difícil de la teoría de la evolución es la formación de la célula. Se han propuesto varios modelos de antecesores de la célula: el más conocido de ollos viene de las representaciones sobre las partículas sólidas, o sea, *coacervatos* (de la palabra latina *coacerve*, que significa agruparse), que se forman bastante fácil en las soluciones de polímeros fuertemente diluidas. El académico A. T. Oparin mostró que en las superficies de estas partículas pueden realizarse reacciones específicas con la participación de catalizadores, o sea, fermentos. Uno de los modelos del embrión de la célula se basa en la posibilidad de formación de las micelas (fig. 128) o, aún mejor, los liposomas (fig. 132). En el último caso la pequeña gotita ya tiene una membrana preparada cuya estructura corresponde a la membrana de la célula viva. Sin embargo, para el día de hoy todas las nociones acerca de cómo se puede obligar a las células a funcionar y reproducirse, resultan discutibles. Como consuelo, es verdad, se puede acordar de las palabras de Woodward que dijo en Estocolmo cuando recibió el premio Nobel: "Ya casi no dudo de que en las condiciones de laboratorio se puede hacer algo con señales características de vida, pero yo no quisiera predecir cuanto tiempo se necesitará para ello".

En la etapa de la evolución biológica el papel de los cristales líquidos casi no provoca dudas. La cosa consiste en que los procesos de la fotosíntesis, los cuales llevaron a

la formación de la atmósfera de oxígeno, se desarollan en las plantas verdes con la participación directa de las membranas de células sobre cuya estructura de cristal líquido ya hemos hablado.

Precisamente en las membranas de cloroplastos están dispuestas las moléculas de clorofila que absorben la energía solar y la transforman en la de enlaces químicos que después se utiliza sintetizándose los hidratos de carbono a partir del gas carbónico. Así como en la respiración celular, el papel de las membranas por lo visto reside en "empaquetar" grandes cuantos de energía en porciones suficientes para la formación de enlaces químicos.

Desde luego los éxitos en la aplicación de la física de los cristales líquidos a los problemas biológicos por ahora aún son modestos, pero no hay duda que en el futuro próximo los cristales líquidos nos conducirán a los descubrimientos impresionantes en la biología.

CONCLUSIÓN

Los autores de este libro, de ningún modo, quisieran oír del lector la siguiente opinión sobre los cristales líquidos: "Interesante, pero ¡qué pena que todo ya aquí está claro y hecho por los físicos, químicos e ingenieros!". No obstante, esta conclusión sería errónea. En realidad, para los que se interesen en serio por esta ciencia se les abre un campo inmenso de acción, les esperan la búsqueda científica difícil, la amargura de fracasos y la alegría de los descubrimientos. Por eso vale la pena finalizando nuestro relato sobre los cristales líquidos nombrar por lo menos algunos problemas no resueltos que, puede ser, deberán resolver nuestros lectores.

Ante todo queremos subrayar que la menos clara y estudiada es la cuestión sobre el papel verdadero del estado de cristal líquido en la vitalidad de los sistemas biológicos. Del último capítulo, desde luego, se ve que en este campo por ahora hay más cuestiones que respuestas y las hipótesis expuestas aún esperan la comprobación con los experimentos. Y es necesario decir que los experimentos físicos en las células vivas son muy complicados tanto técnicamente, como desde el punto de vista de la única interpretación de los resultados. Es que aparte de todo esto hace falta saber exactamente qué cambios llevan a las estructuras finas y propiedades, por ejemplo, de las biomembranas las metodologías experimentales aplicadas. En realidad los científicos están sólo en el comienzo del camino hacia los misterios de lo vivo.

Sin embargo, los más ordinarios cristales líquidos guardan en sí muchos problemas. Es muy importante comprender qué detalles de su constitución deben poseer las moléculas para formar uno u otro estado de cristal líquido, con la estructura determinada y propiedades necesarias para nosotros. Por ejemplo, hasta ahora no hay contestación a la pregunta si es posible la existencia del nemático a tem-

peratura baja, digamos a —60°C y que posee aún una viscosidad moderada. ¿Cuáles tienen que ser las moléculas de esta sustancia? Esto es no sólo una cuestión científica, sino también un problema serio de aplicación, porque la técnica moderna requiere precisamente estos materiales. Las sustancias que existen, funcionan muy bien en esencia a temperatura más alta de —20°C y si se hace más frío, las instalaciones ópticas discutidas más arriba reaccionan bastante despacio.

Especialmente destaquemos los cristales líquidos polímeros. Realmente es muy atrayente recibir en las manos un material que tenga al mismo tiempo las propiedades del polímero y del nemático (colestérico, esméctico, ...). Aquí obtuvimos bastante grandes éxitos. Pero aún nos queda por estudiar a fondo las propiedades de los polímeros de cristales líquidos, buscar los campos más importantes de su aplicación. Por ejemplo, ¿podría la película muy fina de este polímero adquirir las propiedades de casi un ferroeléctrico, es decir, ser bastante sólido y sensiblemente reaccionar a cambios menores del campo eléctrico y distintas deformaciones? Estas películas son necesarias para la nueva generación de instalaciones electroópticas, indicadores de la emisión ultrasonora. Sigue siendo también esencial el perfeccionamiento de la tecnología de la producción de las fibras polímeras ultrasólidas, coques de alta calidad y el grafito. El problema consiste en que el estado intermedio de cristal líquido de estos materiales es difícil de estudiar a causa de las estructuras complicadas de las mezclas, de las reacciones químicas que van continuamente a la temperatura alta. Es que hace falta aprender a dirigir la orientación de las moléculas de estos compuestos para obtener éxitos deseados.

Las cuestiones sobre la interacción de los cristales líquidos con superficies cristalinas, amorfas y polímeras son extraordinariamente actuales, pues de su resolución depende mucho la calidad de todos los aparatos e instalaciones modernos donde se exige una orientación de las moléculas casi ideal. Comparando, por ejemplo, los relojes, computadoras y otras cosas hechas por distintas empresas, se puede sin falta decir qué respuestas son más justas. Y esto es no sólo un problema tecnológico sino también objetivo científico orientado a estudiar la física y la química de las superficies. Por ejemplo, en el libro ya se dijo que los vidrios se utilizan como soportes para los cristales líquidos. Pero los vidrios son muy frágiles y relativamente pesados. Y ¿si

cogemos en vez de vidrio una película polímera? Realmente, si cogimos ... e hicimos una pantalla de cristal líquido 3—5 veces más fina y ligera que la ordinaria la cual, además, se encorva fácilmente, sin que se rompa ni se agriete. Podemos imaginarnos las perspectivas de la utilización de estas pantallas, si ... en su calidad ellas no ceden ante las existentes.

Hagamos una pregunta más. Hasta ahora se tomaba silenciosamente que los propios rayos de luz no influyen esencialmente en la orientación de las moléculas de cristal líquido, digamos nemático. Pero ¿siempre ocurre así? Claro que no. Por ejemplo, la tensión del campo eléctrico en el rayo láser, con la intensidad más grande que 100 W/cm^2, es tal que el propio campo del rayo realiza el efecto de Frederiks en el nemático, es decir, cambia la orientación del eje óptico del material. De este modo se puede formar unos sistemas ópticos que regulan automáticamente el paso de la emisión de láser potente. De esta manera se abre una nueva página de la óptica de los cristales líquidos, que recibió el nombre de "óptica no lineal".

En cuanto a que los cristales líquidos ayuden a crear una pantalla plana para la televisión en colores, este problema interesa a todos los científicos, o sea, físicos y químicos, a los ingenieros-electrónicos, tecnólogos, o sea, especialistas en los dominios de creación de grandes circuitos integrados. Aquí aún hay muchas oscuridades: ¿qué efecto físico y qué estado de cristal líquido será mejor utilizar? ¿es conveniente hacer las celdillas ópticas de muchas capas? ¿qué tecnología moderna es oportuna de emplear? Los caminos de la resolución por ahora sólo se proponen. Todo lo dicho sobre el empleo de los cristales líquidos existentes y del futuro se reduce a la tabla de resumen de la pág. 10.

Damos las gracias al lector paciente, que llegó al final del libro. Si logramos de enseñarle algo, estaremos muy contentos. Y si tuvimos éxito en entusiasmarle con los cristales líquidos, nos sentiremos simplemente felices.